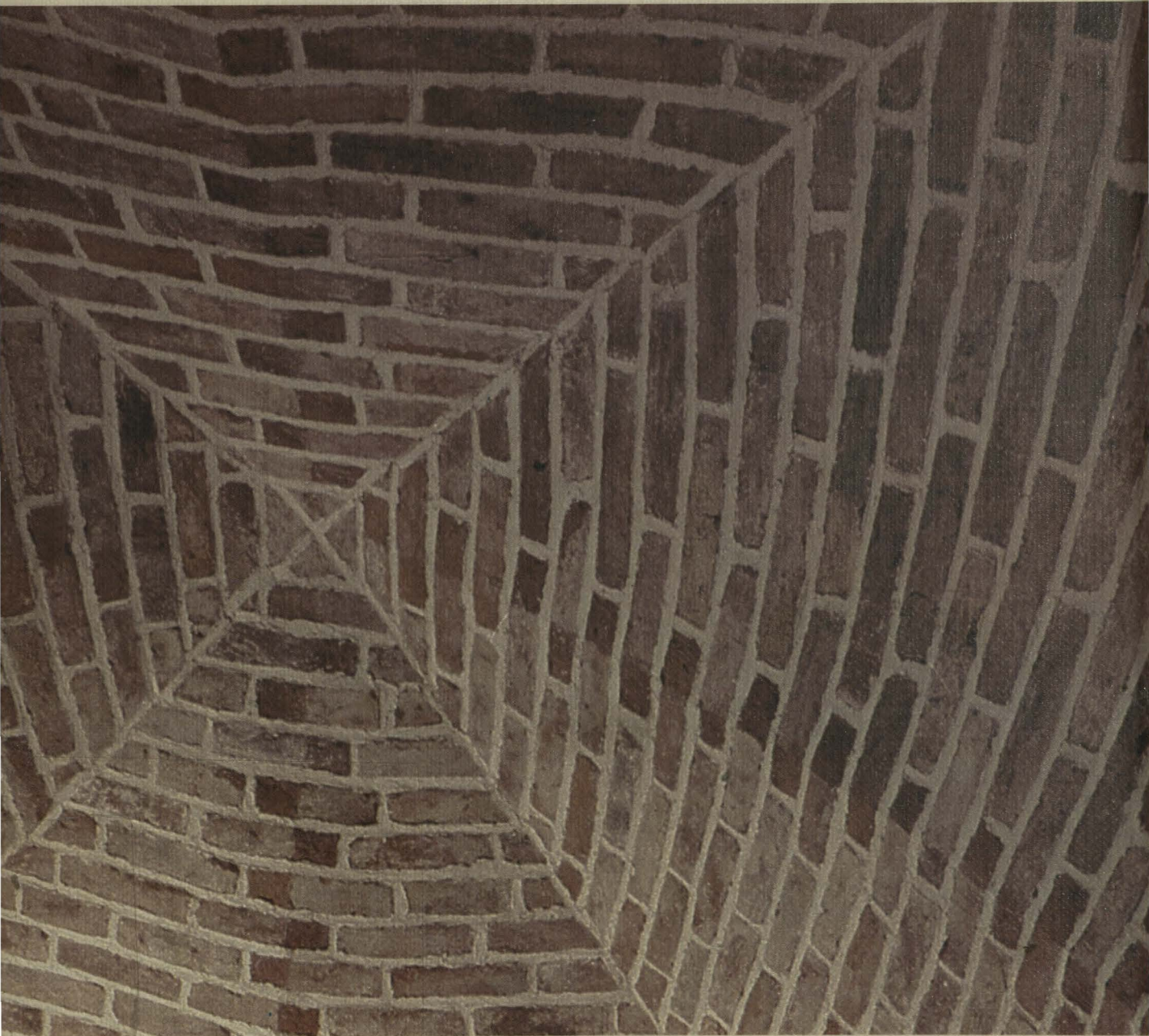


Architektur  
Bauwesen

F.S. Rostásy

# Baustoffe



Kohlhammer

21

UB Braunschweig 84



10016-689-9



LB  
---

3461-709 0

F. S. Rostásy

Ex. 10

# Baustoffe

Verlag W. Kohlhammer  
Stuttgart Berlin Köln Mainz



**CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek**

**Rostásy, Ferdinand S.:**

Baustoffe / F. S. Rostásy.

– Stuttgart ; Berlin ; Köln ; Mainz : Kohlhammer, 1983. –  
(Lehrbuchreihe Architektur)  
ISBN 3-17-007928-X



Alle Rechte vorbehalten  
© 1983 Verlag W. Kohlhammer  
Stuttgart Berlin Köln Mainz  
Verlagsort: Stuttgart  
Gesamtherstellung: W. Kohlhammer  
Druckerei GmbH + Co. Stuttgart  
Printed in Germany

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Vorwort</b>	
<b>2</b>	<b>Allgemeines zu Baustoffen</b>	
2.1	Zur Rolle beim Planen und Bauen	3
2.2	Geschichtliche Entwicklung	4
2.3	Technische Regeln und Zulassungswesen	5
2.4	Baustoffforschung und Materialprüfung	5
2.5	Literatur	6
<b>3</b>	<b>Struktur und Gefüge</b>	
3.1	Einleitung	7
3.2	Zusammenhalt und Zustände der Stoffe	7
3.2.1	Atombau	7
3.2.2	Bindungskräfte und Bindungsenergie	7
3.2.3	Bindungsarten	8
3.2.4	Zustandsformen der Stoffe	9
3.3	Kristalline Stoffe	9
3.3.1	Elementarzelle und Raumgitter	9
3.3.2	Kristallsysteme	9
3.3.3	Baufehler	11
3.3.4	Gefüge	12
3.3.5	Einfluß von Struktur und Gefüge auf Festigkeit und Verformbarkeit	13
3.4	Amorphe Stoffe	14
3.4.1	Definition und Begriffe	14
3.4.2	Gläser	14
3.4.3	Gele	14
3.4.4	Porigkeit amorpher Mehrphasenstoffe	14
3.4.5	Polymere	15
3.5	Verbundwerkstoffe	15
3.5.2	Entwicklungsziele	15
3.5.3	Arten und Gefüge	15
3.6	Literatur	16
<b>4</b>	<b>Grundlagen des Baustoffverhaltens</b>	
4.1	Mechanisches Verhalten	17
4.1.1	Einsatz und Beanspruchung von Baustoffen	17
4.1.2	Mechanische Größen	17
4.1.3	Zur Entstehung von Beanspruchungen	17
4.1.4	Grundarten der Beanspruchung	19
4.1.4.1	Einachsige Beanspruchung	19
4.1.4.2	Mehrachsige Beanspruchung	20
4.1.4.3	Häufige Beanspruchungsfälle	21

4.1.5 Die Arten idealen Verformungsverhaltens . . .	22
4.1.5.1 Elastizität . . . . .	22
4.1.5.2 Plastizität . . . . .	24
4.1.5.3 Viskosität . . . . .	25
4.1.5.4 Viskoelastizität . . . . .	26
4.1.6 Werkstoffverhalten unter statischer Beanspruchung . . . . .	27
4.1.6.1 Baupraktische Bedeutung . . . . .	27
4.1.6.2 Kraft-Verformungsverhalten unter zügiger Beanspruchung . . . . .	27
4.1.6.3 Bruch . . . . .	28
4.1.6.4 Festigkeit der Baustoffe . . . . .	29
4.1.7 Werkstoffverhalten unter schwingender Beanspruchung . . . . .	30
4.1.7.1 Baupraktische Bedeutung . . . . .	30
4.1.7.2 Dauerbruch . . . . .	31
4.1.7.3 Einflüsse auf die Dauerfestigkeit . . . .	32
4.1.8 Normen, Richtlinien . . . . .	32
4.1.9 Literatur . . . . .	32

## 4.2 Verhalten gegenüber Wärme und Kälte . . . . . 33

4.2.1 Bedeutung des Wärmeschutzes . . . . .	33
4.2.2 Wärmetechnische Größen . . . . .	33
4.2.3 Arten der Wärmeübertragung . . . . .	33
4.2.4 Wärmeleitung im Beharrungszustand . . . . .	34
4.2.5 Wärmeleitung im instationären Zustand . . . . .	36
4.2.5.1 Temperatenausgleichsprozeß . . . . .	36
4.2.5.2 Stoffwärme und Wärmespeicherfähigkeit . . . . .	37
4.2.5.3 Temperaturleitfähigkeit und Wärme-eindringverhalten . . . . .	39
4.2.6 Wärmeübertragung durch Strahlung . . . . .	40
4.2.6.1 Zur bautechnischen Bedeutung . . . . .	40
4.2.6.2 Umwandlung von Strahlung in Wärme . . . . .	40
4.2.6.3 Erwärmung durch Sonnenstrahlen . . . . .	41
4.2.6.4 Wärmestrahlungsaustausch zwischen Körpern . . . . .	42
4.2.7 Wärmedehnverhalten . . . . .	43
4.2.7.1 Baupraktische Bedeutung . . . . .	43
4.2.7.2 Wärmeausdehnungszahl . . . . .	43
4.2.8 Normen, Richtlinien . . . . .	43
4.2.9 Literatur . . . . .	44

## 4.3 Verhalten bei Befeuchtung und Trocknung . . . . . 44

4.3.1 Bautechnische Bedeutung . . . . .	44
4.3.2 Feuchtetechnische Größen und Einheiten . . . . .	44
4.3.3 Baustoff und Feuchtigkeit . . . . .	44

4.3.4 Wasser, Wasserdampf und Eis . . . . .	45
4.3.5 Arten des Transports von Feuchte in porösen Baustoffen . . . . .	47
4.3.5.1 Vorbemerkungen, Begriffe . . . . .	47
4.3.5.2 Wasserdampfdiffusion . . . . .	47
4.3.5.3 Kapillare Leitung von Wasser . . . . .	50
4.3.5.4 Leitung von Wasser durch Sickerströmung . . . . .	51
4.3.5.5 Austrocknung kapillarporöser Stoffe . . . . .	52
4.3.5.6 Gleichgewichtsfeuchte und Sorptionsfähigkeit . . . . .	53
4.3.6 Feuchtedehnungen . . . . .	54
4.3.6.1 Vorgang . . . . .	54
4.3.6.2 Praktische Bedeutung . . . . .	55
4.3.7 Normen, Richtlinien . . . . .	55
4.3.8 Literatur . . . . .	55

## 4.4 Lichttechnisches Verhalten . . . . . 55

4.4.1 Bautechnische Bedeutung . . . . .	55
4.4.2 Optische und sichtbare Strahlung . . . . .	55
4.4.3 Lichttechnische Grundgrößen . . . . .	56
4.4.3.1 Lichtmenge $Q$ . . . . .	56
4.4.3.2 Lichtstrom $\Phi = Q/t$ . . . . .	56
4.4.3.3 Lichtstärke $I = \Phi/t$ . . . . .	56
4.4.3.4 Beleuchtungsstärke $E = \Phi/F$ . . . . .	56
4.4.3.5 Leuchtdichte $L = I/F \cdot \cos \varphi$ . . . . .	56
4.4.3.6 Photometrisches Entfernungsgesetz . . . . .	57
4.4.4 Optische Eigenschaften . . . . .	57
4.4.4.1 Begriffe . . . . .	57
4.4.4.2 Transmission . . . . .	57
4.4.4.3 Reflexion . . . . .	58
4.4.4.4 Adsorption . . . . .	58
4.4.4.5 Lichtverteilung . . . . .	59
4.4.4.6 Selektivität . . . . .	60
4.4.5 Normen, Richtlinien . . . . .	61
4.4.6 Literatur . . . . .	61

## 4.5 Verschleiß und Abnutzung . . . . . 61

4.5.1 Bautechnische Bedeutung . . . . .	61
4.5.2 Begriffe und Vorgang . . . . .	61
4.5.3 Elemente des Verschleißvorgangs . . . . .	61
4.5.4 Einflußgrößen des Verschleißvorgangs . . . . .	62
4.5.4.1 Beanspruchungsarten und -größen . . . . .	62
4.5.4.2 Eigenschaften der Elemente . . . . .	63
4.5.5 Mechanismen und Erscheinungsformen des Verschleißes . . . . .	63
4.5.6 Prüfung und Messung von Verschleiß . . . . .	63
4.5.6.1 Verschleißmeßgrößen . . . . .	63
4.5.6.2 Verschleißprüfung und -messung . . . . .	63
4.5.7 Normen, Richtlinien . . . . .	63

<b>4.6 Brandverhalten</b>	64
4.6.1 Bautechnische Bedeutung	64
4.6.2 Brandentstehung, Brandablauf	64
4.6.3 Brandverhalten der Baustoffe	65
4.6.3.1 Grundlegende Vorgänge	65
4.6.3.2 Einteilung der Baustoffe nach DIN 4102	65
4.6.3.3 Brandverhalten von Holz	65
4.6.3.4 Brandverhalten von Kunststoffen	65
4.6.4 Brandverhalten von Bauteilen	66
4.6.4.1 Feuerwiderstand, Feuerwiderstandsdauer	66
4.6.4.2 Temperaturentwicklung während des Brandes	66
4.6.4.3 Feuerwiderstandsklasse nach DIN 4102	67
4.6.5 Normen, Richtlinien	70
4.6.6 Literatur	70

## 5 Überblick über die Baustoffe

<b>5.1 Stahl und Eisengußwerkstoffe</b>	71
5.1.1 Einleitung	71
5.1.2 Metallkundliche Grundlagen	71
5.1.2.1 Kristalle des Eisens und seiner Legierungen	71
5.1.2.2 Vorgänge beim Erstarren und Schmelzen	72
5.1.2.3 Phasenumwandlungen im festen Zustand	74
5.1.2.4 Thermisch aktivierte Vorgänge	75
5.1.3 Roheisen- und Stahlerzeugung	75
5.1.3.1 Roheisenerzeugung	75
5.1.3.2 Stahlerzeugung	76
5.1.4 Beeinflussung der Stahleigenschaften durch die Zusammensetzung, Wärmebehandlung und Umformung	77
5.1.4.1 Zur Wirkung der Stahlbegleiter	77
5.1.4.2 Wärmebehandlung der Stähle	78
5.1.4.3 Wirkung von Legierungselementen	79
5.1.4.4 Formgebung von Stahl durch Umformen	80
5.1.5 Stähle	81
5.1.5.1 Einteilung und Kennzeichnung der Stähle	81
5.1.5.2 Zur Prüfung von Stahleigenschaften	81
5.1.5.3 Allgemeine Baustähle	84
5.1.5.4 Wetterfeste Baustähle	85
5.1.5.5 Hochfeste schweißgeeignete Feinkornbaustähle	85
5.1.5.6 Nichtrostende Stähle	85

5.1.5.7 Weitere Konstruktionsstähle	86
5.1.5.8 Betonstähle	86
5.1.5.9 Spannstähle	88
5.1.6 Zum Schweißen von Stahl	91
5.1.6.1 Begriffe	91
5.1.6.2 Schmelzschweißverfahren	91
5.1.6.3 Preßschweißverfahren	91
5.1.6.4 Schweißgefüge	92
5.1.6.5 Schweißbeignung der Stähle	92
5.1.7 Eisengußwerkstoffe	93
5.1.7.1 Begriffe und Einteilung	93
5.1.7.2 Gußeisen mit Lamellengraphit	93
5.1.7.3 Gußeisen mit Kugelgraphit	93
5.1.7.4 Temperguß	93
5.1.7.5 Stahlguß	93
5.1.8 Normen, Richtlinien	93
5.1.9 Literatur	94

## 5.2 Nichteisenmetalle

5.2.1 Einleitung	94
5.2.2 Aluminium und Aluminiumlegierungen	94
5.2.2.1 Bautechnische Bedeutung	94
5.2.2.2 Gewinnung	95
5.2.2.3 Verfestigungsmethoden	95
5.2.2.4 Werkstoffarten	95
5.2.2.5 Eigenschaften	96
5.2.2.6 Fügeverfahren	97
5.2.2.7 Anwendung im Bauwesen	97
5.2.2.8 Normen, Richtlinien	98
5.2.2.9 Literatur	98
5.2.3 Kupfer und Kupferlegierungen	98
5.2.3.1 Bautechnische Bedeutung	98
5.2.3.2 Gewinnung	98
5.2.3.3 Eigenschaften	98
5.2.3.4 Kupferlegierungen	98
5.2.3.5 Anwendung im Bauwesen	98
5.2.4 Blei und Bleilegierungen	98
5.2.4.1 Bautechnische Bedeutung	98
5.2.4.2 Gewinnung	98
5.2.4.3 Eigenschaften	98
5.2.4.4 Anwendung im Bauwesen	99
5.2.5 Zink und Zinklegierungen	99
5.2.5.1 Bautechnische Bedeutung	99
5.2.5.2 Gewinnung	99
5.2.5.3 Eigenschaften	99
5.2.5.4 Zinklegierungen	99
5.2.5.5 Anwendung im Bauwesen	99

## 5.3 Korrosion und Korrosionsschutz der Baumetalle

5.3.1 Bautechnische Bedeutung	99
5.3.2 Begriffe und Unterscheidungen	99



5.3.3 Korrosionsbeanspruchungen . . . . .	100	5.4.7.2 Kunststoffe im Bautenschutz . . . . .	121
5.3.3.1 Vorbemerkungen . . . . .	100	5.4.7.3 Wärme- und Schalldämmung durch Schaumkunststoffe . . . . .	121
5.3.3.2 Korrosionsbeanspruchungen durch die Umgebung . . . . .	100	5.4.7.4 Kunstharze als Bindemittel für Beton, Mörtel und Putz . . . . .	122
5.3.4 Korrosionsprozeß . . . . .	101	5.4.7.5 Leime und Kleber aus Kunststoffen . . . . .	123
5.3.4.1 Vorbemerkungen . . . . .	101	5.4.7.6 Glasfaserverstärkte Kunststoffe GFK . . . . .	123
5.3.4.2 Grundlagen der elektrochemischen Korrosion . . . . .	101	5.4.8 Normen, Richtlinien . . . . .	123
5.3.4.3 Arten und Erscheinungsformen . . . . .	103	5.4.9 Literatur . . . . .	124
5.3.5 Korrosionsverhalten der wichtigsten Baumetalle an der Atmosphäre . . . . .	105		
5.3.5.1 Vorbemerkungen . . . . .	105	<b>5.5 Holz und Holzwerkstoffe . . . . .</b>	<b>124</b>
5.3.5.2 Verhalten der Baustähle . . . . .	105	5.5.1 Einleitung . . . . .	124
5.3.5.3 Verhalten der nichtrostenden Stähle . . . . .	106	5.5.2 Holzarten . . . . .	125
5.3.5.4 Verhalten einiger Nichteisenmetalle . . . . .	106	5.5.3 Aufbau des Holzes . . . . .	125
5.3.6 Korrosionsschutz im Stahlbau . . . . .	107	5.5.3.1 Chemische Zusammensetzung . . . . .	125
5.3.6.1 Maßnahmen zur Vermeidung von Korrosionsschäden . . . . .	107	5.5.3.2 Biologischer Aufbau . . . . .	126
5.3.6.2 Aktiver Korrosionsschutz . . . . .	107	5.5.3.3 Holzfehler . . . . .	126
5.3.6.3 Arten des passiven Korrosions- schutzes . . . . .	108	5.5.4 Physikalische und mechanische Eigenschaften von Vollholz . . . . .	127
5.3.6.4 Metallische Überzüge . . . . .	108	5.5.4.1 Physikalische Eigenschaften . . . . .	127
5.3.6.5 Beschichtungen . . . . .	109	5.5.4.2 Festigkeit und Verformbarkeit . . . . .	127
5.3.7 Normen, Richtlinien . . . . .	112	5.5.5 Holz und Holzwerkstoffe, Sorten und Arten . . . . .	130
5.3.8 Literatur . . . . .	112	5.5.5.1 Gütebedingungen . . . . .	130
<b>5.4 Kunststoffe . . . . .</b>	<b>112</b>	5.5.5.2 Vollholz . . . . .	130
5.4.1 Einleitung . . . . .	112	5.5.5.3 Holzwerkstoffe . . . . .	131
5.4.2 Bildungsreaktionen der Kunststoffe . . . . .	113	5.5.6 Holzschutz . . . . .	132
5.4.2.1 Ausgangsstoffe . . . . .	113	5.5.6.1 Schadeinflüsse . . . . .	132
5.4.2.2 Polymerisation . . . . .	113	5.5.6.2 Natürliche Widerstandsfähigkeit des Holzes gegen Schadeinflüsse . . . . .	134
5.4.2.3 Polykondensation . . . . .	113	5.5.6.3 Konstruktiver Holzschutz . . . . .	134
5.4.2.4 Polyaddition . . . . .	113	5.5.6.4 Chemischer Holzschutz . . . . .	134
5.4.2.5 Mischformen . . . . .	114	5.5.7 Verbindungen im Holzbau . . . . .	135
5.4.2.6 Silikone . . . . .	114	5.5.7.1 Zimmermannsmäßige Verbindungen . . . . .	135
5.4.3 Struktur der Kunststoffe . . . . .	114	5.5.7.2 Eingelassene und eingetriebene Verbindungsmitel . . . . .	135
5.4.4 Aggregatzustände der Kunststoffe . . . . .	114	5.5.7.3 Leimverbindungen . . . . .	136
5.4.4.1 Amorphe Thermoplaste . . . . .	114	5.5.8 Normen, Richtlinien . . . . .	136
5.4.4.2 Teilkristalline Thermoplaste . . . . .	116	5.5.9 Literatur . . . . .	137
5.4.4.3 Elastomere . . . . .	116		
5.4.4.4 Duromere . . . . .	116	<b>5.6 Mineralische Bindemittel . . . . .</b>	<b>137</b>
5.4.5 Eigenschaften der Kunststoffe . . . . .	116	5.6.1 Einleitung . . . . .	137
5.4.5.1 Mechanische Eigenschaften . . . . .	116	5.6.2 Zement . . . . .	137
5.4.5.2 Thermische Eigenschaften . . . . .	119	5.6.2.1 Arten und Bestandteile der Zemente . . . . .	137
5.4.5.3 Brandverhalten . . . . .	119	5.6.2.2 Hydratation . . . . .	138
5.4.5.4 Resistenz . . . . .	119	5.6.2.3 Struktur und Porosität des Zementsteins . . . . .	141
5.4.6 Lieferformen und Verarbeitung . . . . .	119	5.6.2.4 Festigkeit . . . . .	145
5.4.6.1 Herstellung und Formung von Kunststoffprodukten . . . . .	119	5.6.2.5 Mahlfineinheit . . . . .	146
5.4.6.2 Verarbeitung der Kunststoffe . . . . .	120	5.6.2.6 Raumbeständigkeit . . . . .	146
5.4.7 Anwendungsgebiete der Kunststoffe im Bauwesen . . . . .	121	5.6.2.7 Verformungen des Zementsteins . . . . .	147
5.4.7.1 Überblick . . . . .	121		

5.6.2.8	Weitere Eigenschaften des Zementsteins . . . . .	150	5.7.6.2	Festigkeitsprüfung . . . . .	171
5.6.2.9	Normen, Richtlinien . . . . .	151	5.7.6.3	Werkstoffeinflüsse . . . . .	173
5.6.2.10	Literatur . . . . .	151	5.7.6.4	Einfluß der Erhärtingsbedingungen . . . . .	175
5.6.3	Baukalk . . . . .	151	5.7.6.5	Einfluß der Mehrachsigkeit der Beanspruchung . . . . .	177
5.6.3.1	Arten. . . . .	151	5.7.6.6	Einfluß der Beanspruchungsgeschichte . . . . .	177
5.6.3.2	Erzeugung der Baukalke . . . . .	151	5.7.6.7	Einfluß hoher und tiefer Temperaturen . . . . .	179
5.6.3.3	Erhärtung . . . . .	151	5.7.6.8	Möglichkeiten zur Verfestigung von Beton . . . . .	181
5.6.3.4	Wichtige bautechnische Eigenschaften . . . . .	152	5.7.7	Verformungsverhalten von Normalbeton . . . . .	182
5.6.3.5	Normen, Richtlinien . . . . .	152	5.7.7.1	Einteilung . . . . .	182
5.6.3.6	Literatur . . . . .	152	5.7.7.2	Verformungen bei Kurzzeitbelastung . . . . .	182
5.6.4	Gips . . . . .	153	5.7.7.3	Kriechen unter Dauerlast und Spannungsrelaxation . . . . .	186
5.6.4.1	Arten. . . . .	153	5.7.7.4	Schwinden. . . . .	188
5.6.4.2	Hydratation. . . . .	153	5.7.7.5	Wärmedehnverhalten . . . . .	189
5.6.4.3	Wesentliche bautechnische Eigenschaften . . . . .	154	5.7.8	Dauerhaftigkeit von Beton . . . . .	190
5.6.4.4	Gipsbauplatten. . . . .	155	5.7.8.1	Bautechnische Bedeutung, Begriffe . . . . .	190
5.6.4.5	Normen, Richtlinien . . . . .	155	5.7.8.2	Beanspruchungen und Wirkungen . . . . .	190
5.6.4.6	Literatur . . . . .	155	5.7.8.3	Durchlässigkeit von Zementstein und Beton . . . . .	191
<b>5.7</b>	<b>Beton und Mörtel . . . . .</b>	<b>155</b>	5.7.8.4	Rißbildung . . . . .	193
5.7.1	Einleitung. . . . .	155	5.7.8.5	Betonangriff durch Frost und Auftausalze. . . . .	194
5.7.1.1	Definitionen . . . . .	155	5.7.8.6	Chemischer Angriff, Betonkorrosion . . . . .	196
5.7.1.2	Wesentliche Unterscheidungen und Begriffe . . . . .	155	5.7.8.7	Erosion . . . . .	199
5.7.1.3	Zusammenhang zwischen Eigenschaften und Herstellkosten . . . . .	156	5.7.8.8	Verwitterung . . . . .	199
5.7.2	Ausgangsstoffe. . . . .	156	5.7.8.9	Korrosion von Stahl in Beton und Einpreßmörtel . . . . .	200
5.7.2.1	Zement . . . . .	156	5.7.8.10	Vorbeugender Schutz von Betonbauwerken . . . . .	203
5.7.2.2	Zugabewasser. . . . .	156	5.7.8.11	Behebung von Schäden . . . . .	206
5.7.2.3	Betonzusatzmittel . . . . .	157	5.7.9	Einige Sonderbetone . . . . .	206
5.7.2.4	Betonzusatzstoffe . . . . .	157	5.7.9.1	Vorbemerkungen . . . . .	206
5.7.2.5	Betonzuschlag. . . . .	158	5.7.9.2	Leichtbetone. . . . .	206
5.7.2.6	Kornzusammensetzung des Zuschlagsgemisches für Normalbeton . . . . .	160	5.7.10	Mörtel . . . . .	209
5.7.3	Eigenschaften des Frischbetons . . . . .	162	5.7.11	Normen, Richtlinien. . . . .	213
5.7.3.1	Verarbeitbarkeit . . . . .	162	5.7.12	Literatur . . . . .	213
5.7.3.2	Frischbetonrohichte und Luftgehalt . . . . .	163	<b>5.8</b>	<b>Künstliche Steine . . . . .</b>	<b>215</b>
5.7.3.3	Frischbetontemperatur. . . . .	163	5.8.1	Allgemeines . . . . .	215
5.7.3.4	Entmischungsneigung . . . . .	164	5.8.2	Keramische Baustoffe . . . . .	215
5.7.4	Betonzusammensetzung. . . . .	164	5.8.2.1	Einteilung . . . . .	215
5.7.4.1	Ziele . . . . .	164	5.8.2.2	Herstellung . . . . .	216
5.7.4.2	Anforderungen an Beton nach DIN 1045. . . . .	164	5.8.2.3	Keramische Produkte und ihre Eigenschaften. . . . .	217
5.7.4.3	Wasserzementwert-Regel . . . . .	165	5.8.2.4	Mauerwerksausblühungen . . . . .	218
5.7.4.4	Mischungsentwurf . . . . .	166	5.8.3	Mineralisch gebundene Baustoffe . . . . .	218
5.7.5	Herstellen, Verarbeiten und Nachbehandeln . . . . .	167	5.8.3.1	Kalksandsteine . . . . .	218
5.7.5.1	Betonherstellung. . . . .	167	5.8.3.2	Hüttensteine . . . . .	218
5.7.5.2	Fördern . . . . .	167	5.8.3.3	Betonsteine . . . . .	218
5.7.5.3	Einbau des Frischbetons . . . . .	168	5.8.3.4	Gipsbausteine und -platten . . . . .	219
5.7.5.4	Verdichtung . . . . .	168			
5.7.5.5	Nachbehandlung und Schutz. . . . .	168			
5.7.6	Festigkeit von Normalbeton. . . . .	169			
5.7.6.1	Bruchmechanismus . . . . .	169			

5.8.4	Normen, Richtlinien. . . . .	219	5.9.4.2	Optische Eigenschaften . . . . .	221
5.8.5	Literatur . . . . .	219	5.9.4.3	Mechanische Eigenschaften . . . . .	222
<b>5.9</b>	<b>Bauglas . . . . .</b>	<b>219</b>	5.9.4.4	Thermische Eigenschaften . . . . .	222
5.9.1	Bautechnische Bedeutung . . . . .	219	5.9.5	Einteilung der Baugläser . . . . .	222
5.9.2	Chemische Zusammensetzung und Struktur des Glases . . . . .	220	5.9.6	Bauglaserzeugnisse und Anwendung. . . . .	222
5.9.3	Herstellung und Verarbeitung. . . . .	220	5.9.6.1	Flachglas. . . . .	222
5.9.3.1	Schmelzvorgang. . . . .	221	5.9.6.2	Kompaktglas. . . . .	223
5.9.3.2	Formgebung . . . . .	221	5.9.7	Faserglas . . . . .	224
5.9.3.3	Nachbehandlung. . . . .	221	5.9.8	Schaumglas . . . . .	224
5.9.4	Eigenschaften des Glases . . . . .	221	5.9.9	Normen, Richtlinien. . . . .	224
5.9.4.1	Chemische Eigenschaften . . . . .	221	5.9.10	Literatur . . . . .	224
			<b>Sachwortregister . . . . .</b>	<b>225</b>	

# 1 Vorwort

Daß die Baustoffe bei der Planung und Verwirklichung von Bauwerken eine wichtige, oft ausschlaggebende Rolle spielen, wird allgemein anerkannt. Aus diesem Grund bedarf ein neues Lehrbuch über Baustoffe sicherlich keiner prinzipiellen Rechtfertigung. Gleichwohl verfolgt jedes neue Buch, so auch dieses, bestimmte Absichten, die den künftigen Leserkreis, den Inhalt und die didaktische Methode betreffen.

Das Buch wendet sich an den Studenten und Praktiker zugleich. Für den Studenten der Architektur oder des Bauingenieurwesens stellt die Baustoffkunde einen wesentlichen Teil des Grundstudiums dar, der ihm beim Entwerfen und Konstruieren von Bauwerken gegenwärtig sein muß. Eine für Architekten und Bauingenieure unterschiedliche Lehre über Baustoffe gibt es nicht; beide bauen sie mit den gleichen Stoffen. Unterschiede treten bestenfalls in der Wertigkeit von Stoffeigenschaften auf.

Das Buch wendet sich aber auch an Architekten und Bauingenieure in der Praxis, die das Empfinden haben, daß ihnen die Grundlagen des Baustoffverhaltens unter dem Druck des Alltags zunehmend entschwinden. Hier soll das Buch helfen, Bekanntes aufzufrischen und Neues zu erwerben. Durch Hinweise auf Literatur und technische Regeln wird der Weg zu vertiefenden Kenntnissen und zur Praxis gewiesen.

Die didaktische Methode des Buchs lautet: Grundlagenwissen vor Tatsachenwissen. Alle Fragen und Probleme, die

mit dem Herstellen, Verarbeiten und Verhalten von Baustoffen zusammenhängen, beginnen an den naturwissenschaftlichen und technischen Grundlagen der Stoffe. Der rasche Wandel in der Technologie der Herstellung und der Verfügbarkeit von Baustoffen, die stürmische Entwicklung neuer Stoffe und Stoffkombinationen und vieles andere mehr erzwingen die Vertiefung des Wissens um die Grundlagen. Nur auf diese Weise kann der Student und auch der Praktiker ein verschleißfestes, zukunftsicheres Werkzeug erwerben, mit dem er neuartige Probleme sicher zu beurteilen und zu lösen vermag. Trotz des Primats der Grundlagen ist auch ein solides Wissen um die Technologie der Stoffe erforderlich. Mit den Stoffen von heute werden wir auch morgen noch bauen. Der Überblick über die Baustoffe in diesem Buch ist unvollständig, schließlich müssen in vielerlei Hinsicht Prioritäten gesetzt werden.

Das Schreiben eines Lehrbuchs ist kein Alleingang. So standen dem Verfasser auch in diesem Fall zahlreiche Helfer zur Seite. Frau Dipl.-Ing. A. Rohling und Herr Dipl.-Ing. H. Budelmann wirkten bei einigen Abschnitten mit. Frau I. Juffart und Frau H. Schroeder-Herri schrieben in sorgfältiger Weise das Manuskript, und Frl. Weidemeier hat sämtliche Bilder gezeichnet. All diesen Helfern gebührt aufrichtiger Dank. Schließlich gilt besonderer Dank Frau Helga Rostásy, die Geduld und Verständnis für viele durchgearbeitete Abende und Wochenenden bewies.





## 2 Allgemeines zu Baustoffen

### 2.1 Zur Rolle beim Planen und Bauen

Ingenieurmäßiges und architektonisches Entwerfen beinhalten das Aufstellen und Umsetzen von Forderungen und Bedingungen in Flächen, Räume und Körper, die nur mit Hilfe von Konstruktionen zu realisieren sind. Aus diesem Grunde sind das Entwerfen, Konstruieren und wesentliche Folgeschritte baulicher Verwirklichung zusammenhängende Vorgänge des Planungsprozesses.

Keiner der genannten Vorgänge ist »stofflos« möglich. Im Gegenteil: Bereits die ersten Planungsschritte bedingen das Abwägen und Wählen von Baustoffen, um die Anforderungen von Funktion, Baugestaltung, Konstruktion, Herstelltechnik u.a. zu erfüllen. Welche vielfältigen Forderungen und Bedingungen in die Planung eines Bauwerks einfließen, zeigt Bild 2.1, nahezu alle sind mit der Baustoffwahl verknüpft.

Das Bauen hat seit jeher sowohl elementare als auch kulturelle Aufgaben zu erfüllen: Menschen, deren Einrichtungen und Güter müssen gegen die Unbill der Natur geschützt werden. Anlagen zur Wohlfahrt, Einrichtungen und Transportwege für Menschen, Güter und Energie müssen erstellt werden.

Aus den Aufgaben, die Bauwerke erfüllen müssen, leiten sich Anforderungen an die Baustoffe bzw. an deren Verhalten ab. Die Anforderungen umfassen: Die technische Einsetzbarkeit, die Form- und Fügbarkeit und die Wirtschaftlichkeit von Baustoffen (s. Tab. 2.1).

Die technische Einsetzbarkeit hängt mit jenen Eigenschaften der Baustoffe zusammen, die deren Verhalten unter Kräften, unter physikalischen und chemischen Einflüssen und bei Brand bestimmen. Baustoffe müssen formbar sein und sich zusammenfügen lassen. Schließlich kommt der Wirtschaftlichkeit eines Baustoffs, vor allem im Wettstreit mit anderen, eine wichtige Rolle zu. Baukosten sind immer zum beträchtlichen Anteil Stoffkosten.

Der Maschinenbau, die Elektrotechnik und hiermit verwandte Sparten bezeichnen ihre Stoffe als Werkstoffe. Man versteht darunter jene festen Stoffe, aus denen zum einen Werkstücke (Turbinenschaufel, Schraube u.a.) geformt

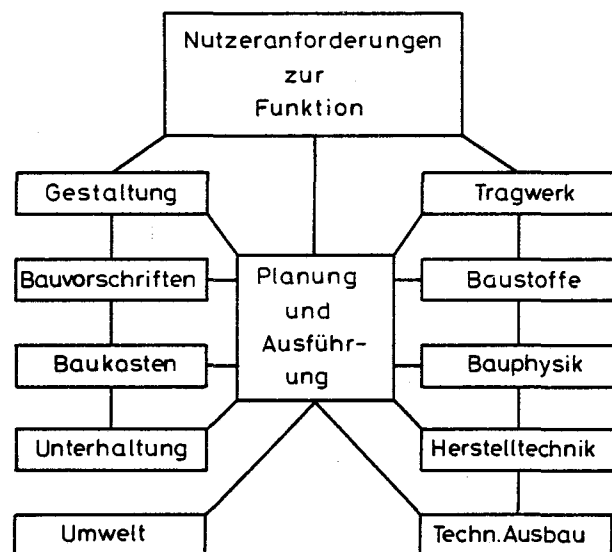


Bild 2.1 Einflüsse auf Planung und Ausführung

werden, und zum anderen auch jene, mit denen Werkstücke formgebend bearbeitet werden (»Werkzeug«-Stoffe; z.B. Schneidstahl für Bohrer). Da Bauteile (Balken, Stütze, Decke u.a.) auch Werkstücke darstellen, besitzen die Begriffe Baustoff und Werkstoff zum mindesten in Teilbereichen einen einheitlichen Sinn. Darüber hinaus gehören zu den Baustoffen auch solche, für die keine der beiden oben angeführten Definitionen eines Werkstoffs zutrifft. Letztendlich ist die strenge Begriffsbildung in diesem Fall nicht bedeutsam.

Die Stoffgruppen des Bauwesens und Beispiele für Baustoffe zeigt Bild 2.2. Große Bedeutung erlangen die vielfältigen Verbundbaustoffe. Hierunter sind gezielte Paarungen von Stoffen zu verstehen, deren Gesamtwirkung die Teilwirkungen der Partner übertrifft [2].

Tab. 2.1 Anforderungen an Baustoffe und Eigenschaften von Baustoffen

Anforderungen	Eigenschaften
Technische Einsetzbarkeit	Mech. Verhalten
	Festigkeit, Härte Elastizität Zähigkeit Temperaturbeständigkeit Verschleißwiderstand
	Feuerwiderstand
	Entflammbarkeit Brennbarkeit Toxizität Hochtemperaturverhalten
	Phys.-chem. Verhalten
	Dichte wärmetechnisches, feuchte- technisches, schalltechnisches und lichttechnisches Verhalten; Korrosionsbeständigkeit Elektr. und magnet. Verhalten
Form- und Fügbarkeit	Gießbarkeit, Formbarkeit Verarbeitbarkeit, Gestaltbarkeit u. a. Schweißbarkeit, Klebbarkeit
Wirtschaftlichkeit	kostengünstige Gewinnbarkeit, Herstell- und Formbarkeit, mögliche Wiederverwertbarkeit, geringe Umweltbelastung bei Gewinnung, Herstellung, Recycling u. a.

## 2.2 Geschichtliche Entwicklung

Die kulturelle und technische Entwicklung der Menschheit ist auch immer mit der Entwicklung der Werk- und Baustoffe verbunden. Die Bezeichnung von Epochen, wie Steinzeit, Bronzezeit und Eisenzeit, weist auf diese Entwicklung hin und läßt erkennen, welche bestimmende Rolle das jeweilige Material für Kult, Kunst und Handwerk gespielt haben muß.

Der Naturstein ist der archaische Bau- und Werkstoff schlechthin. In der Steinzeit, rd. 200000 Jahre v. Chr. beginnend, dient er als Baustoff für Behausungen und als Werkstoff für Werkzeuge. Holz als Baustoff ist so alt wie die Urhütte des Menschen. Der Beginn der Keramik ist bei rd. 10000 bis 20000 v. Chr. anzusetzen. Die ersten gebrannten Ziegel für den Hausbau wurden um 4000 v. Chr. in Mesopotamien hergestellt, Mörtel aus Lehm, Gips sowie Kalk und die Glasuren wurden erfunden.

Die Verhüttung von Kupfer reicht bis 8000 v. Chr. zurück, das Legieren von Kupfer und Zinn zur Bronze ist bei rd. 3000 v. Chr. anzusiedeln, und die Eisenzeit setzt um 1500

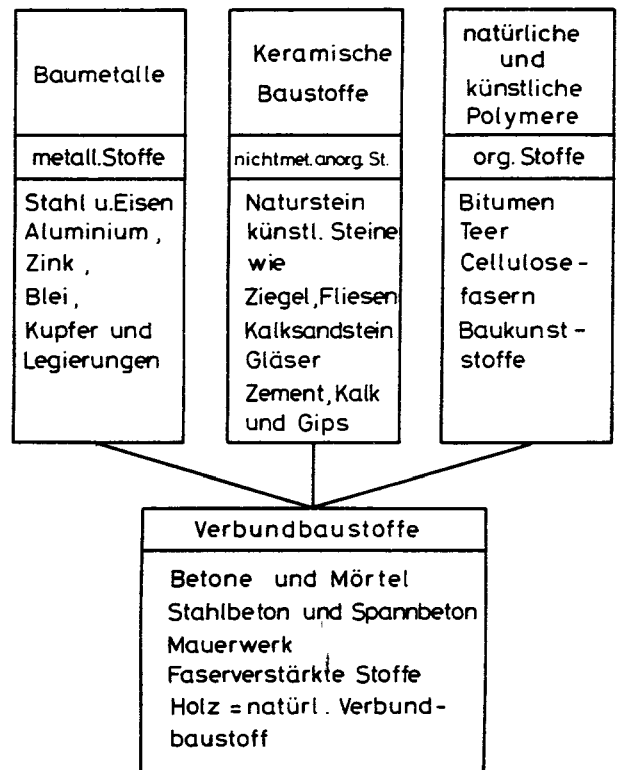


Bild 2.2 Baustoffgruppen

v. Chr. ein. Diese ersten Metalle dienen der Herstellung von Werkzeug, Waffen, Kultgerät und Schmuck.

In der Römerzeit werden die Ziegel und Mörtel fortentwickelt. Vitruv berichtet um rd. 10 n. Chr. über die hydraulischen Mörtel und deren Anwendung für Aquädukte, Wehranlagen u. a.

Das Mittelalter ist eine Zeit des Stillstands in der Entwicklung der Baustoffe, aber die Blütezeit des Sakralbaus. Die Aufklärung im 17. und 18. Jh. markiert die Geburt der Naturwissenschaften, deren Denkansatz und Methode fortan auch die stürmische Entwicklung der Bau- und Werkstoffe leitet.

Mit der Erfindung des Portlandzements um 1850 beginnt der Betonbau. Das Frischen von Stahl im Konverter und das Legieren führen nicht nur zu verbesserter Güte, sondern u. a. zur Massenproduktion von Walzeisenprofilen. Das 20. Jh. ist gekennzeichnet durch Qualitätssteigerung, Produktionszunahme, Fortentwicklung und Erfindungen. Als Beispiele für letztere sind die Aluminiumlegierungen, die Kunststoffe, aber auch die Verbundwerkstoffe und die Werkstoffverbunde zu nennen (faserverstärkte Stoffe, Sandwichelemente, Stahlbeton und Spannbeton).

Die Entwicklung der Baustoffe bringt aber auch den Wandel der Bauweisen mit sich. Der Baumeister vergangener Tage baute mit wenigen Baustoffen, eben mit Naturstein, Ziegel, Mörtel und Holz. Der Kanon der Konstruktionsformen war klein, die handwerkliche Sorgfalt groß. Planungs- und Bauzeit waren viel länger als heute. Mit nur wenigen Baustoffen konnten alle Forderungen von Baugestaltung, Tragfähigkeit, Witterungs-, Wärme- und Schallschutz erfüllt werden. Handwerkliches Können und gesicherte Erfahrungen mit den Bauweisen ließen die Zahl der Bauschäden gering bleiben.

Verglichen hiermit ist der Wandel im 20. Jh. groß und häufig nicht zum Guten. Das Übergewicht der Lohnkosten gegenüber den Stoffkosten und andere Faktoren führen zu neuen Baustoffen und Bauweisen. Viele der modernen Baustoffe erfüllen nur eine der Anforderungen, eben jene, für die sie entwickelt wurden. Dieser Umstand erzwingt die Kombination mehrerer Stoffe in einem Bauteil, wodurch neuartige Probleme der Verträglichkeit und der Dauerhaftigkeit bei gegenüber früher verschlechterten Umweltbedingungen entstehen. Die dramatische Zunahme der Bauschäden in jüngster Zeit steht sicherlich hiermit im Zusammenhang. Die wirksame Gegenwehr erfordert ein fundiertes Wissen um das Verhalten der Baustoffe beim Planer und Ausführenden.

## 2.3 Technische Regeln und Zulassungswesen

Technische Regeln und Gesetze für das Bauen gibt es schon seit rd. viertausend Jahren. Im Kodex des babylonischen Königs Hammurapi um 1700 v. Chr. werden z.B. Strafordrohungen gegen den Erbauer eines Hauses ausgesprochen, wenn durch dessen Fehler andere Menschen Schaden erleiden. Bereits dieses erste »Baugesetz« enthält die Elemente Sicherheit für Menschen und Qualitätssicherung von Stoffen und Bauleistungen, die auch noch heute unverändert gelten.

Im Zuge der Entwicklung, insbesondere der Industrialisierung am Ende des vergangenen Jahrhunderts, traten zu den Elementen Sicherheit und Produktqualität die Forderungen nach Vereinheitlichung von Maßen, Eigenschaften u. a. Insbesondere auf Initiative der Industrie entstanden die ersten technischen Regelwerke (Normalien, Normen), wie z.B. das Normalprofilbuch für Walzeisenprofile und die ersten Prüf- und Gütenormen für Portlandzement.

Seit mehr als sechzig Jahren ist die Normung vereinheitlicht. Mit der Erarbeitung und Ausgabe von DIN-Normen (Deutsche Industrienorm), die zwar nicht die einzigen technischen Regeln darstellen, ist das DIN (Deutsches Institut für Normung e. V.) betraut. Das DIN wirkt auch bei der internationalen Normung mit.

Der Sinn der Normung ist nach DIN 820, 2.74 wie folgt definiert [1]:

»Normung ist die planmäßige, durch die interessierten Kreise gemeinschaftlich durchgeführte Vereinheitlichung von materiellen und immateriellen Gegenständen zum Nutzen der Allgemeinheit. Sie darf nicht zum wirtschaftlichen Sondervorteil einzelner führen.

Sie fördert die Rationalisierung und Qualitätssicherung in Wirtschaft, Technik, Wissenschaft und Verwaltung. Sie dient der Sicherheit von Menschen und Sachen sowie der Qualitätsverbesserung in allen Lebensbereichen.

Sie dient außerdem einer sinnvollen Ordnung und der Information auf dem jeweiligen Normungsgebiet.«

Die DIN-Normen und andere gleichwertige technische Regeln stellen sogen. »anerkannte Regeln der Technik« dar bzw. sind angewandt auf das Bauwesen »anerkannte Regeln der Bautechnik«. Die Anerkennung einer techni-

schen Regel wird vorausgesetzt, wenn sich diese in der Praxis bewährt hat und die Fachleute von ihrer Richtigkeit überzeugt sind. Nach dem Verfahren, wie eine Norm erarbeitet wird, und nach den Einspruchsmöglichkeiten gegen eine Norm kann man davon ausgehen, daß eine herausgegebene Norm eine anerkannte Regel darstellt. Sie ist jedoch kein Gesetz.

Da die Normung eines Gegenstandes dessen Praxisbewährung voraussetzt, die Erstellung einer Norm oft mehrere Jahre benötigt und eine Norm nur in größeren Zeitschritten novelliert werden kann, wird sie den gegenwärtigen Stand der Technik in der Regel nicht vollumfänglich darstellen. Sich über den vorwärts schreitenden Stand der Technik Kenntnis zu verschaffen und ihn zu berücksichtigen, fällt in die persönliche Verantwortung des Fachmanns.

Nicht alle Baustoffe und Bauarten können abschließend durch Normen geregelt werden. Dies gilt besonders für Neuentwicklungen. Um diese zu fördern und dem baupraktischen Einsatz zuzuführen, wurde das Zulassungs- und Prüfzeichenwesen eingeführt, das unter die Verantwortung des Instituts für Bautechnik in Berlin (IfBt) fällt. Zur Überprüfung der Eignung eines neuartigen Baustoffs oder einer neuartigen Bauart bedient sich das IfBt der Sachverständigenausschüsse (SVA), die sich aus unabhängigen Fachleuten zusammensetzen. Ist der Nachweis der Eignung erfolgt, so erhält der Zulassungsgegenstand eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder einen Prüfbescheid, wodurch der Einsatz im vorgegebenen Rahmen für eine definierte Zeitspanne ermöglicht wird. Der Nachweis der Güte des Gegenstands wird durch die Überwachung (Güteüberwachung) erbracht. Der erst- und/oder einmalige Einsatz eines Gegenstands wird durch die Zustimmung im Einzelfall ermöglicht.

Die für die Erstellung einer baulichen Anlage maßgebende übergeordnete Rechtsvorschrift ist die jeweilige Landesbauordnung (LBO). Eine LBO kann jedoch in erster Linie nur allgemeine Anforderungen stellen. Zur Realisierung der Anforderungen verweist die LBO daher auf die allgemein anerkannten Regeln der Baukunst und Technik, die bei Planung, Berechnung und Ausführung berücksichtigt werden müssen.

Die Bauordnungen bestimmen, daß als anerkannte Regeln die technischen Baubestimmungen gelten. Unter den technischen Baubestimmungen versteht man jene DIN-Normen des Normenausschusses Bauwesen (NABau) im DIN, die von den Obersten Baubehörden durch öffentliche Bekanntmachung eingeführt werden. Meist sind dies Normen, die die Sicherheit von Bauwerken betreffen. Auch andere technische Regeln können bauaufsichtlich eingeführt werden.

## 2.4 Baustoffforschung und Materialprüfung

Die Entwicklung von Baustoffen ist stets von Forschung begleitet. Es ist deren Aufgabe, das Verhalten der Baustoffe unter den vielfältigen mechanischen, physikalischen und chemischen Einwirkungen zu klären, die während des Gebrauchs eines Bauwerks auftreten können. Bereits Tab. 2.1 gibt Hinweise darauf, welche Eigenschaften angesprochen werden und über die technische Einsetzbarkeit



eines Baustoffs entscheiden. Das Verhalten muß vor dem Hintergrund der Struktur (Fein- oder Mikrostruktur) und dem Gefüge (Grob- oder Makrostruktur) eines Stoffes erforscht werden, die zum einen von Stoffart, zum anderen von den technologischen Prozessen der Stoffherstellung und -verarbeitung abhängen. Aus der Koppelung zwischen dem Verhalten einerseits sowie der Struktur und dem Gefüge andererseits leiten sich die Möglichkeiten zur Baustoffverbesserung und die Kriterien der Einsetzbarkeit (Baustoffwahl) für die Praxis ab.

Das Verhalten eines Baustoffs bzw. eine Baustoffeigenschaft kann man nicht berechnen, sondern nur auf deduktivem Wege durch Experiment und Analyse erforschen. Aus diesem Grunde ist die Materialprüfung (Baustoff- oder Werkstoffprüfung) zum wichtigsten Instrument sowohl der Forschung als auch der Baustoffherstellung (Qualitätskontrolle) geworden. Die Materialprüfung bedient sich des Prüfens und Messens. Beim Prüfen wird eine Baustoffprobe oder ein komplexerer Versuchskörper einer äußeren Einwirkung (z.B. Kraft oder aggressive Lösung) unterworfen. Durch Messen werden zum einen geometrische, physikalische und chemische Eigenschaften erfaßt und zum anderen die Reaktionen der Probe auf die äußere Einwirkung aufgenommen. Da das Ergebnis von der angewandten Prüf- und Meßmethode häufig beeinflusst wird, müssen beide streng definiert werden. Dies erfolgt z.B. in baustoffabhängigen Prüfnormen. Insbesondere in der Forschung ist man bestrebt, das Verhalten eines Baustoffs wirklichkeitsnah zu erfassen und zu prüfen. Die Simulation der Realität im Experiment gestaltet sich jedoch meist als schwierig bis unlösbar. Bei zahlreichen Prüfverfahren haben Einfachheit und Reproduzierbarkeit den Vorrang gegenüber der Wirklichkeitsnähe des Prüfergebnisses. In solchen Fällen erhält man als Ergebnisse technologische Kennwerte und Informationen über das Baustoffverhalten, die vor allem für die Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse von Bedeutung sind.

Die Materialprüfung unterscheidet zwischen zerstörungsfreien und zerstörenden Prüfverfahren. Die zerstörungsfreien Verfahren werden überwiegend an Bauteilen, -werken oder an Baustoffprodukten angewandt, bei denen die Probenentnahme mit einer Schädigung oder gar Zerstörung

verbunden wäre [5]. Bei den zerstörenden Verfahren wird die Baustoffprobe oder der Versuchskörper entweder ganz oder bereichsweise zerstört. Von großer Bedeutung sind strukturanalytische Untersuchungsverfahren, die Zustand und Veränderung von Struktur und Gefüge in Abhängigkeit von den technologischen Vorgängen der Baustoffbildung und von äußeren Einwirkungen aufzeigen [2].

Näheres über die Verfahren des Prüfens und Messens, deren Problematik und Aussagekraft kann [3] und [4] entnommen werden. In Abschn. 5 wird auf Baustoffprüfnormen verwiesen.

Schließlich muß auch noch auf die Rolle der Statistik hingewiesen werden, die zum unabdingbaren Hilfsmittel der Baustoffforschung und der Gütekontrolle von Baustoffeigenschaften geworden ist. Die Ergebnisse von Prüfungen sind stets mit Streuungen behaftet, die auch bei definierter Versuchsdurchführung durch Zufälligkeiten im Material, der Herstellmethode u. a. verursacht werden. Es ist die Aufgabe der Statistik, die Aussagekraft streuender Prüf- und/oder Meßergebnisse zu bewerten und zu quantifizieren. Dies ist vor allem für die Gütekontrolle von Bedeutung, wenn Aussagen zur bedingungsgemäßen Tauglichkeit von Stoffen und Produkten getroffen werden müssen. Näheres zu den statistischen Methoden zur Beurteilung streuender Baustoffeigenschaften kann [3] und [4] entnommen werden.

## 2.5 Literatur

- [1] Klein, M.: Einführung in die DIN-Normen. 8. Auflage; B. G. Teubner, Stuttgart und Beuth Verlag, Berlin und Köln, 1980.
- [2] Illschner, B.: Werkstoffwissenschaften. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg und New York, 1982.
- [3] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile. Band 1, Allgemeine Eigenschaften, Meßtechnik und Statistik. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1973.
- [4] Stehno, G.: Baustoffe und Baustoffprüfung. Springer-Verlag, Wien und New York, 1981.
- [5] Diem, P.: Zerstörungsfreie Prüfmethode für das Bauwesen. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1982.

# 3 Struktur und Gefüge

## 3.1 Einleitung

Die Eigenschaften der Werkstoffe sind in hohem Maße sowohl von den Gesetzmäßigkeiten des atomaren und molekularen Feinbaus, der Struktur, als auch vom Gefüge abhängig. Unter Gefüge ist die Grobstruktur eines Stoffes zu verstehen, die neben den Fehlern in der Struktur alle anderen, bei der Herstellung eines Werkstoffes entstehenden Imperfektionen umfaßt. Die Kenntnis vom Einfluß von Struktur und Gefüge auf das Werkstoffverhalten ist die wesentliche Voraussetzung sowohl für das Begreifen von Eigenschaften als auch zu deren gezielten Beeinflussung.

Die Darstellung der Zusammenhänge erfolgt hier auf sehr knappem Raum. Die weiterführende Literatur von Abschnitt 3.6 verhilft zu vertieften Kenntnissen.

## 3.2 Zusammenhalt und Zustände der Stoffe

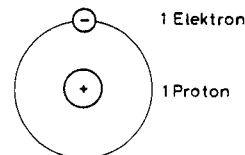
### 3.2.1 Atombau

Das Atom ist der kleinste, nicht mehr teilbare Baustein eines Stoffes (Ausnahme: Kernspaltung). Ein Atom besteht aus dem elektrisch positiv geladenen Kern, der von negativ geladenen Elektronen auf definierten, in der Regel mehreren Schalen (z.B. Kugelschalen nach dem Bohrschen Atommodell) umkreist wird. Die Verbindung mehrerer Atome führt zum Molekül.

Der Kern wird durch positiv geladene Protonen und elektrisch neutrale Neutronen gebildet, die gemeinsam die Masse des Atoms bilden (Atomgewicht). Der Kern bestimmt im wesentlichen das spezifische Gewicht eines Stoffes; die Elektronen sind nahezu masselos. Die Kernladungszahl eines Protons entspricht der eines Elektrons (s. Bild 3.1 für Wasserstoff und Helium); Anzahl der Protonen = Anzahl der Elektronen.

Die Kugelschalen sind nicht gleichmäßig mit Elektronen besetzt. Die Anordnung der Elektronen um den Kern bestimmt die Art und Energie der Bindung zwischen Atomen sowie die mechanischen Eigenschaften, den Schmelz- und Siedepunkt, die thermische Dehnbarkeit, die elektrische und thermische Leitfähigkeit eines Stoffes. Für die chemische Bindung zwischen Atomen sind die Elektronen der äußersten Schale, Valenzelektronen genannt, maßgebend.

Wasserstoffatom



Heliumatom

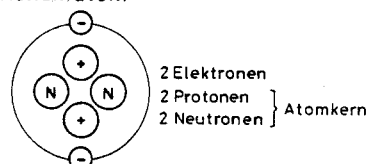


Bild 3.1 Atombau des Wasserstoff- und Heliumatoms

### 3.2.2 Bindungskräfte und Bindungsenergie

Die Bindung von Atomen zu einem festen Körper kommt durch Wechselwirkung zustande, die von den Elektronen der äußeren Schalen ausgeht. Die Wechselwirkung besteht aus anziehenden und abstoßenden Kräften, die mit wachsendem Atomabstand  $r$  rasch nach einem Exponentialgesetz abnehmen (s. Bild 3.2). Im Gleichgewichtszustand heben sich die Kräfte gerade auf. Zur gegenseitigen Verschiebung von zwei Atomen, also auch zur Trennung, müssen die Wechselwirkungskräfte Arbeit leisten. Im Atomab-

stand  $r_0$  ist die Summe ihrer Einzelarbeiten ein Minimum, das als Bindungsenergie  $E_B$  bezeichnet wird. Sie entspricht der Arbeit, die bei  $0^\circ \text{ K}$  (ohne Zufuhr von äußerer Energie) geleistet werden muß, um die Atome völlig zu trennen.

Die Bindungsenergie bestimmt eine Reihe von Werkstoffeigenschaften. Je tiefer das Energieminimum liegt bzw. je größer  $|E_B|$  ist, umso höher sind Festigkeit, Schmelz- und Verdampfungstemperatur. Der Elastizitätsmodul ist umso größer, je kleiner die Krümmung der  $E_B$ -Kurve an der Stelle  $r_0$  ist.

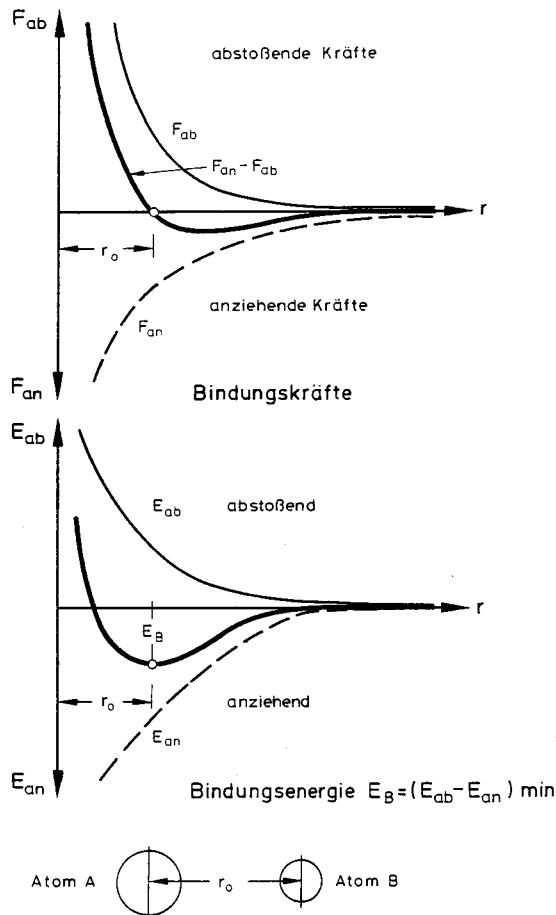


Bild 3.2 Bindungskräfte und Bindungsenergie

### 3.2.3 Bindungsarten

Man unterscheidet zwischen chemischen oder atomaren und physikalischen oder zwischenmolekularen Bindungen. Die chemische Bindung entsteht durch Umgruppierung der Elektronen der äußeren Schalen der Atome. Die Atome sind bestrebt, ihre äußere Schale mit acht Elektronen zur stabilen Edelgaskonfiguration aufzufüllen, da die Bindung des Atoms hierdurch größte Stabilität bei minimaler potentieller Energie erhält. Es werden folgende chemische Bindungen unterschieden: Ionenbindung, Atombindung und Metallbindung. Das elektrostatische Bindungsmodell ist nicht völlig realistisch. Daher erscheint die chemische Bindung eines Stoffes anteilig aus verschiedenen Bindungsarten zusammengesetzt. In den folgenden Bildbeispielen sind nur die äußersten Elektronenschalen dargestellt.

Die Ionenbindung, auch heteropolare Bindung genannt, tritt bevorzugt zwischen zwei verschiedenen Elementen auf, die eine stark unterschiedliche Elektronenbesetzung der Außenschale aufweisen. Bild 3.3 zeigt den Vorgang der Ionenbindung am Beispiel des Kochsalzes. Das Natriumatom gibt das Valenzelektron seiner Außenschale ab und wird damit zum positiv geladenen Kation (Elektronübergang). Das in die Außenschale des Chlors eingebaute Elektron verwandelt dieses zum negativ geladenen Anion. Anion und Kation ziehen sich elektrostatisch an; es entsteht eine feste Verbindung. Die Ionenbindung ist nicht orientiert, weil die Anziehungs- und Abstoßungskräfte in allen Richtungen des Raumes gleich wirken. Die oxidischen Verbindungen der Erdalkalimetalle, aus denen die keramischen Baustoffe aufgebaut sind, sind zum Teil ionengebunden.

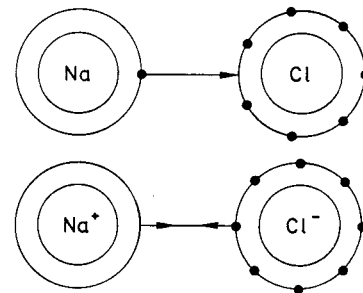


Bild 3.3 Ionenbindung

Die Atombindung, auch kovalente Bindung genannt, tritt sowohl zwischen gleichen als auch zwischen verschiedenen Elementen auf. Sie ist dadurch gekennzeichnet, daß sich die beiden Elemente eine gemeinsame Außenschale mit acht Elektronen teilen (Elektronenaustausch). Damit entsteht eine sehr feste und orientierte Verbindung. In Bild 3.4 ist als Beispiel die Bildung des Fluormoleküls dargestellt.

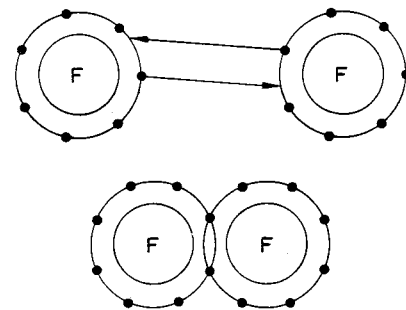


Bild 3.4 Atombindung

Die Metallbindung tritt sowohl zwischen gleichen als auch zwischen verschiedenen Elementen auf (reine Metalle), deren Außenschalen eine geringe Anzahl von Valenzelektronen aufweisen. Die Atome geben die Valenzelektronen an ein »Elektronengas« ab (negative Ladung). Dadurch entstehen elektrostatische Anziehungskräfte zwischen den positiv geladenen Atomresten und dem Elektronengas. Die freie Beweglichkeit der Elektronen im Elektronengas ist die Ursache für die gute elektrische und thermische Leitfähigkeit der Metalle. Die Metallbindung ist nicht orientiert.

Die physikalischen Bindungen treten zwischen Molekülen auf, die zwar in sich elektrisch neutral sind, aber eine unsymmetrische Ladungsverteilung aufweisen. Die Unsymmetrie der Ladung bewirkt ein Dipolmoment und elektrostatische Anziehungskräfte, die man als »van der Waalsche Kräfte« bezeichnet. Es gibt verschiedene Arten zwischenmolekularer Bindung, von denen hier nur die wichtigste, nämlich die Wasserstoffbrückenbindung besprochen wird. Bild 3.5 zeigt, wie die unsymmetrische Ladung des Wassermoleküls zur gegenseitigen Anziehung führt. Auch die Festigkeit thermoplastischer Kunststoffe beruht auf zwischenmolekularen Kräften.

Die Bindungsarten unterscheiden sich in ihrer Festigkeit, die durch die Bindungsenergie bestimmt wird. Die Rangfolge der Festigkeit der Bindungsarten lautet: Atombindung, Ionenbindung, Metallbindung und zwischenmolekulare Bindung.

Die weitaus schwächste zwischenmolekulare Bindung nimmt mit Zunahme des Molekülabstands rasch ab. Sie besitzt jedoch eine große Bedeutung, nicht nur für die Festigkeitsbildung von anorganischen Bindemitteln, sondern beeinflusst auch eine Reihe von Eigenschaften wie Viskosität, Oberflächenspannung, Dampfdruck, Adhäsion u. a., die den Feuchte-, Gas- und Wärmetausch in porösen Baustoffen bestimmen.

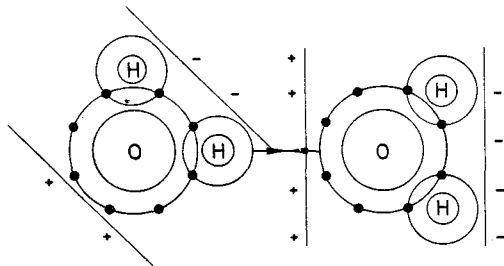


Bild 3.5 Wasserstoffbrückenbindung

### 3.2.4 Zustandsformen der Stoffe

Die Atome, Moleküle und Ionen eines Stoffes können in zwei extremen Ordnungszuständen vorliegen:

- Die maximale Unordnung der Teilchen ist der ideale Gaszustand.
- Die maximale Ordnung der Teilchen herrscht im idealen Kristallzustand vor.

Die Aggregatzustände der realen Stoffe liegen zwischen diesen Extremen. Im Gas ist die größte, regellose Beweglichkeit der Teilchen vorhanden. In der Flüssigkeit ist die Beweglichkeit durch Wechselwirkungskräfte bereits eingeschränkt. Im Festkörper schwingen die Teilchen um einen festen Platz; ihre Schwingungsenergie nimmt mit der Temperatur zu.

Die Änderung eines Aggregatzustands geht mit einer Änderung der inneren Energie einher. Zum Schmelzen eines Stoffes, s. Bild 3.6, muß die latente Schmelzwärme zugeführt werden, um die Bindungsenergie zu überwinden. Umgekehrt wird die Erstarrungswärme bei der Zustandsänderung flüssige Phase → feste Phase frei. Entsprechendes gilt für die Phasenübergänge Verdampfen und Kondensieren.

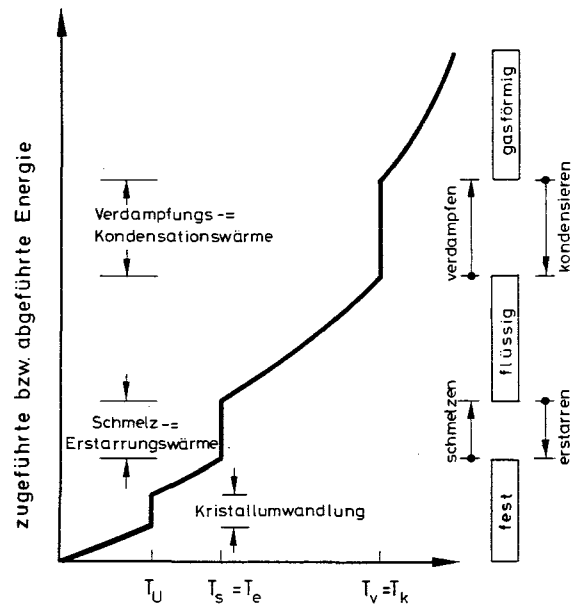


Bild 3.6 Änderung des Energieinhalts eines kristallinen Stoffes bei Steigerung bzw. Verminderung der Temperatur und bei konstantem Druck

## 3.3 Kristalline Stoffe

### 3.3.1 Elementarzelle und Raumgitter

Beim Erstarren aus dem flüssigen Zustand der Schmelze ordnen sich die Atome oder Ionen zu einem geometrisch regelmäßigen und räumlichen Kristallgitter. Grundbaustein des Gitters ist die Elementarzelle, s. Bild 3.7, in deren Ecken die Atome, als Kugeln versinnbildlicht, angeordnet sind. Die Ionenschwerpunkte können auch auf Diagonalen, im Flächenmittelpunkt oder in der Mitte liegen.

Die Atome sind bei der Anordnung im Raumgitter bestrebt, folgende Bedingungen zu erfüllen:

- Minimum an Bindungsenergie
- Maximum an Bindungen
- Wahrung elektrostatischer Neutralität
- Ordnung entsprechend der Orientierung der Bindung.

Die Geometrie der Elementarzelle wird durch die Atomabstände – diese bedingt durch Ionenradius und Ladung – (0,25 bis 0,5 nm; 1 nm = 10<sup>-6</sup> mm) und Gitterwinkel beschrieben. Durch additive Reihung der Zellen entstehen das Gitter und der Kristallit (idealer Vielkristall ohne Fehler).

### 3.3.2 Kristallsysteme

Nach der Form der Zelle unterscheidet man sieben Kristallsysteme, mit denen durch zusätzliche Atome in den Flächen- oder Raummitten der Elementarzelle insgesamt 14 Elementarzellentypen entstehen. In Tab. 3.1 sind die Kristallsysteme, deren Gitterparameter und einige hiernach kristallisierende Elemente aufgeführt. Einige der Kristalltypen kommen in der Natur für Einstoffsysteme nicht vor, sondern erst bei Mehrstoffkristallen (chemische Verbindungen). Beispiele hierfür werden in Klammer angegeben.



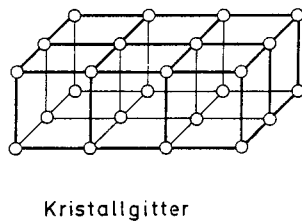
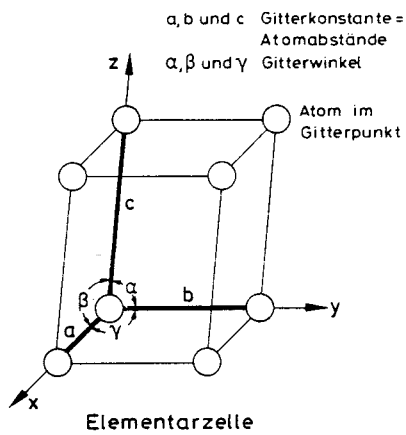


Bild 3.7 Elementarzelle und Kristallgitter

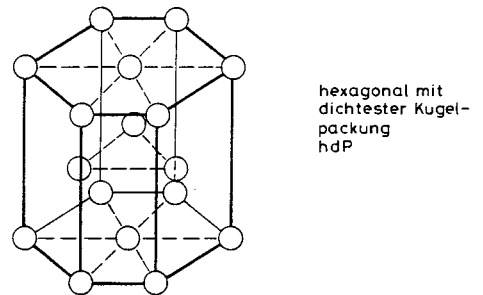
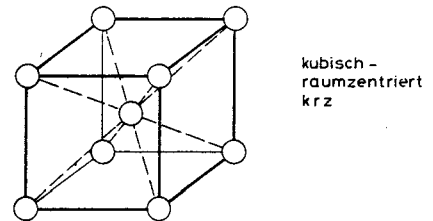
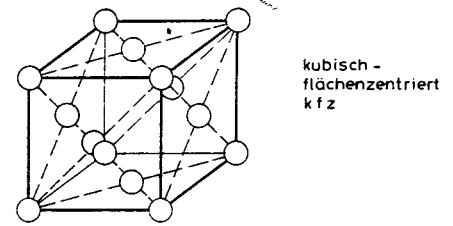


Bild 3.8 Kristallgitterformen von Metallen

Metalle kristallisieren nach den in Bild 3.8 dargestellten Kristallgitterformen aus. In den Ecken des Gitters sind die Metallionen angeordnet, die Zwischenräume sind von Elektronengas erfüllt. Die kubischen Raumgitter krz und kfz sind Modifikationen des primitiven Würfelgitters, bei dem nur die acht Ecken durch Ionen besetzt sind. Die Kristallmodifikationen entstehen aus dem Bestreben der Atome nach einer möglichst hohen Packungsdichte, da nur dann die Bindungsenergie ein Minimum wird. Unter Packungsdichte ist das Verhältnis des von den Ionen eingenommenen Volumens zum Gesamtvolumen zu verstehen.

In Bild 3.9 werden die Packungen des kfz- und des krz-Gitters verglichen. Man erkennt, daß das kfz-Gitter die dichteste kubische Packung besitzt: Ein Atom wird von 12 gleich großen umgeben und berührt. Diese Feststellung gilt auch für die hdP-Modifikation des hexagonalen Gitters.

Manche Stoffe können in mehreren Modifikationen existieren. Beispielsweise kann Eisen entweder nach dem krz- oder nach dem kfz-Typ kristallisieren. Jede der Modifikationen ist aber nur innerhalb eines bestimmten Temperaturintervalls stabil. So klappt das krz-Gitter von reinem Eisen bei Erwärmung bei der Umwandlungstemperatur  $T_U = 906^\circ\text{C}$  in das kfz-Gitter um und dieses wieder bei  $1401^\circ\text{C}$  in das krz-Gitter zurück (s. Bild 3.8). Diese Eigenschaft heißt Allotropie.

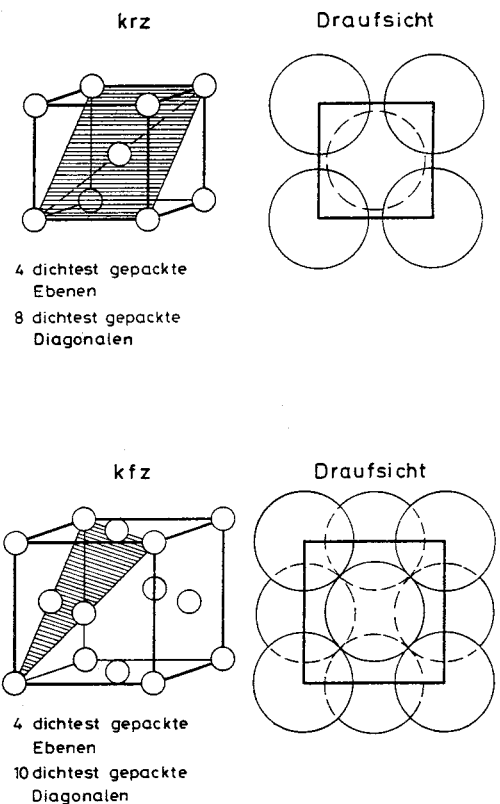


Bild 3.9 Packungen der krz- und kfz-Gitter

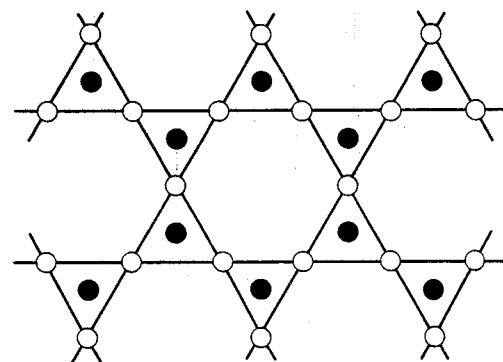
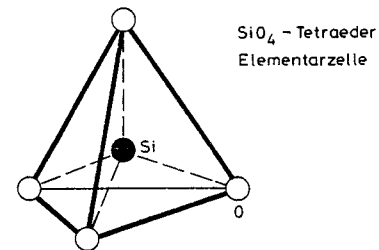
Tab. 3.1 Kristallsysteme und Beispiele

Gittertyp		Gitterparameter	Beispiele [chem. Verbindungen]
triklin	1	$a \neq b \neq c$ $\alpha, \beta, \gamma (\neq 90^\circ)$	
monoklin	2	$a \neq b \neq c$ $\beta \neq 90^\circ; \alpha = \gamma 90^\circ$	[Gips $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ]
rhombisch (belieb. Quader)	3	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	[Kalkspat $\text{CaCO}_3$ ]
hexagonal	4	$a \neq c, b = a$ $\gamma = 120^\circ; \alpha = \beta = 90^\circ$	[ $\beta$ -Quarz] Titan, Zink, Magnesium (hdP)
trigonal (rhomboedrisch)	5	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	[ $\alpha$ -Quarz]
tetragonal (Quader mit $a = b$ )	6	$a \neq c, b = a$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Zinn
kubisch (Würfel)	7	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	krz $\alpha$ -Eisen, Wolfram, Chrom
			kfz $\gamma$ -Eisen, Kupfer, Blei

Die nichtmetallischen, anorganischen Werkstoffe sind stets Mehrstoffsysteme, chemische Verbindungen wie Oxide, Nitride, Karbide usw., die überwiegend durch Ionenbindung zusammengehalten werden und als Ionenkristalle auskristallisieren. Der wichtigste Baustein der Keramik ist der Silikattetraeder, s. Bild 3.10, mit dem räumliche Silikatstrukturen geknüpft werden können [8]. Der in Bild 3.10 dargestellte Schichtkristall ist nur eine von mehreren Strukturformen.

Bei der nichtorientierten Ionenbindung hängt die Anordnung der Ionen von Ladung und Radius der Ionen ab. Zur Wahrung der Elektroneutralität umgibt sich das Kation, z. B.  $\text{Si}^{4+}$ , mit möglichst vielen Anionen, z. B.  $\text{O}^{2-}$ , die gerade das Kation berühren dürfen. Die Ausbildung der Gitterform ist im wesentlichen vom Verhältnis der Radien der Ionen  $r_K/r_A$  abhängig.

Die Kunststoffe (Hochpolymere) sind von der Struktur her den amorphen Werkstoffen zuzuordnen. Gleichwohl können durch Faltung linearer Kunststoffketten bereichsweise kristalline Ordnungen auftreten. Dies ist bei den teilkristallinen Thermoplasten der Fall (s. Abschnitt 5.4).



$\text{SiO}_2$  - Schichtstruktur

Bild 3.10 Silikattetraeder und kristallisierte reine Kieselsäure

### 3.3.3 Baufehler

Im Gegensatz zum bisher besprochenen idealen Einkristall ist der Realkristall nicht fehlerfrei. Beim Erstarren aus der Schmelze sind die Atome, insbesondere bei hoher Abkühlgeschwindigkeit, nicht in der Lage, das ideale Raumgitter fehlerlos aufzubauen. Die resultierenden Gitterbaufehler führen zur Verzerrung des Raumgitters und damit zu dessen Schwächung gegenüber dem Idealkristall. Jede Abweichung von der idealen Ordnung führt zu einer Erhöhung der inneren Energie gegenüber der minimalen Bindungsenergie. Dies bedeutet, daß das gestörte Gitter thermodynamisch weniger stabil ist als das ungestörte und durch Zufuhr von thermischer und/oder mechanischer Arbeit eher verän-

dert wird. Dieser Umstand erklärt die viel geringere Festigkeit des Realkristalls im Vergleich zum Idealkristall. Weiterhin ermöglichen erst die Baufehler einige technische Prozesse wie die Einwanderung von Fremdatomen beim Randschichthärten, die Kaltumformung u. a. mehr.

Nach der Form der Baufehler unterscheidet man:

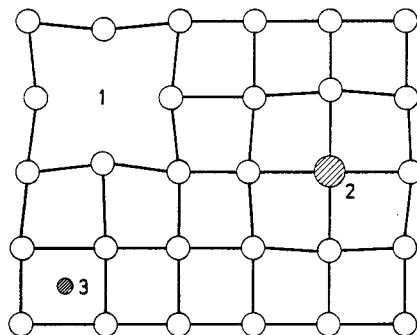
- Punktfehler
- Linienfehler
- Flächenfehler

Bild 3.11 zeigt einige punktförmige Baufehler. Der nicht besetzte Gitterplatz heißt Leerstelle. Die Leerstellendichte

nimmt mit steigender Temperatur zu. Dies ist z. B. Voraussetzung für die Wanderung von Fremdatomen durch Diffusion. Fremdatome können auf Gitter- oder Zwischengitterplätzen gelagert sein. Dieser Vorgang wird beim Legieren bewußt angestrebt (s. Mischkristallverfestigung).

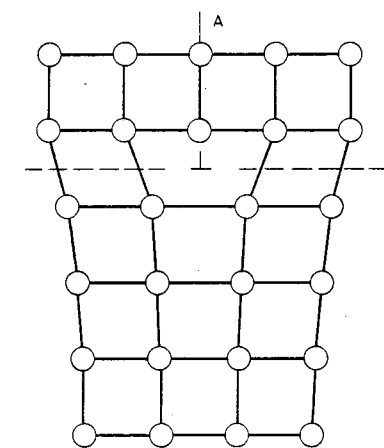
Die Linienfehler werden Versetzungen genannt, weil entlang von Gitterlinien ein treppen- oder schraubenförmiger Versatz von Gitterebenen auftritt. Bild 3.12 zeigt eine Stufenversetzung: Durch die bei A eingeschobene Gitterebene entsteht zu beiden Seiten eine stufenförmige Gitterverzerrung, die mit inneren Spannungen verbunden ist. Die Versetzungslinie, mit dem Symbol  $\perp$  dargestellt, steht normal zur Bildebene; sie kann an der Oberfläche beginnen und im Inneren des Kristalls enden oder durchgehen. Bei der Schraubenversetzung ist die Versetzungslinie eine Schraubenlinie.

Die Häufigkeit von Versetzungen in einem Kristallit wird durch die Versetzungsdichte beschrieben, die die Linielänge der Versetzungen pro Volumen darstellt. Versetzungen erhöhen die innere Energie und sind deshalb thermodynamisch instabil: Sie können durch Wärme und mechanische



- 1 Leerstelle
- 2 Substitutionsatom
- 3 Einlagerungsatom

Bild 3.11 Einige Punktfehler im Kristallbau



- $\perp$  Symbol für Stufenversetzung
- bevorzugte Gleitebene

Bild 3.12 Stufenversetzung

sche Energie bewegt werden. Hierauf beruht die plastische Verformbarkeit und Verfestigung von Baumetallen.

Bei der Übereinanderreihung mehrerer Stufenversetzungen entsteht der Flächenfehler Kleinwinkelkorngrenze, durch welche der Kristall in Blöcke unterschiedlicher Gitterneigung unterteilt wird (Mosaik- oder Subkornstruktur, s. Bild 3.13). Die Berandung des Realkristalls (Korn) ist die Korngrenze. Sie stellt ebenfalls einen Flächenfehler dar, weil sich die Gitterrichtungen benachbarter Körner voneinander unterscheiden und die Überbrückung von Korn zu Korn durch 2 bis 3 strukturlose Atomreihen erfolgen muß (Großwinkelkorngrenzen). Weitere Abweichungen von der Idealordnung entstehen durch Stapelfehler und Zwillingsbildung (s. Abschnitt 3.3.5).

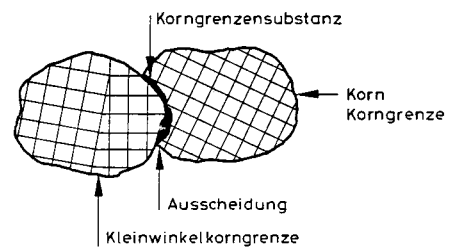


Bild 3.13 Körner und Gefüge, schematisch

### 3.3.4 Gefüge

Kristalline Werkstoffe bestehen nicht aus einem, sondern aus vielen Kristallen, die man Kristallite oder Körner nennt. Das Korn entsteht durch Kristallwachstum aus der Schmelze, das entweder von einem Keim (sehr kleiner fester Partikel, z. B. ein Karbid) ausgeht oder durch Unterkühlung. Innerhalb des Korns herrscht, abgesehen von Kristallbaufehlern, die ideale Ordnung des Raumgitters.

Der Verband der Körner ist das Gefüge. Es beinhaltet nicht nur die kristalline Ordnung selbst, sondern auch die Abweichungen hiervon. Die Abweichungen umfassen neben den Fehlern in der Mikrostruktur auch andere Störungen wie z. B. Ausscheidungen an Korngrenzen, Schlackeneinschlüsse, Poren u. a. mehr. Bild 3.13 zeigt schematisch eine Kleinwinkelkorngrenze innerhalb des linken Korns. Die größeren Winkelabweichungen zwischen den Gitterebenen benachbarter Körner sind die Großwinkelkorngrenzen.

Korngröße und -form hängen von den thermischen Bedingungen beim Erstarren, Umformen und Wärmebehandeln ab. Die Festigkeits- und Verformungseigenschaften von metallischen Baustoffen werden nachhaltig vom Gefüge beeinflusst und damit über die Kornform auch beeinflussbar. Unlösliche Bestandteile (Verunreinigungen) werden an Korngrenzen als Korngrenzsubstanz ausgeschieden. Ist diese verformbar, so bestimmen die Körner die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs. Harte Korngrenzsubstancen werden bewußt zur Verfestigung (Ausscheidungshärtung) erzeugt. Spröde Korngrenzsubstancen können z. B. zur Versprödung von Stahl führen.

Der Idealkristall besitzt richtungsabhängige mechanische Eigenschaften. Diese Richtungsabhängigkeit wird als Anisotropie bezeichnet, die am Beispiel des krz-Kristalls von Bild 3.9 erklärt werden kann: Bei Beanspruchung in Rich-

tung einer Raumdiagonalen wird sich im Vergleich zur Beanspruchung in Richtung einer Flächendiagonalen eine unterschiedliche Verformung einstellen. Diese auch im einzelnen Korn vorhandene Anisotropie verschwindet jedoch im Gefüge, weil die Kristallachsen der Körner regellos gegeneinander verdreht sind. Damit wird das Werkstoffverhalten wieder richtungsunabhängig (Quasiisotropie).

Durch bestimmte Herstellprozesse, beispielsweise durch die warme und kalte Umformung von Stahl, kann das beim Erstarren entstandene Gefüge verändert werden. Beim Warm- und Kaltwalzen werden die Körner gestreckt, und die Kristallachsen werden gerichtet, s. Bild 3.14. Man spricht dann von einer Textur, z. B. Walztextur, die mit einer Anisotropie verbunden ist. Beispiel: Tiefziehblech hat in Ziehrichtung eine höhere Festigkeit als quer dazu.

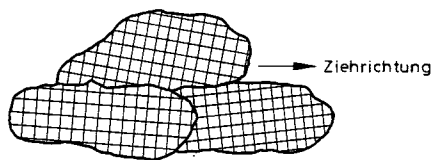


Bild 3.14 Ausrichtung der Körner, Beispiel Ziehstruktur

Die kristallinen Werkstoffe bestehen stets nicht nur aus einem Stoff, sondern stellen Mischungen mehrerer Stoffkomponenten dar. Diese Feststellung gilt sinngemäß auch für nichtkristalline Werkstoffe. Die Bestandteile des Gefüges nennt man Phasen, worunter in sich geschlossene Bereiche bestimmter Zusammensetzung und Struktur verstanden werden. Die Körner von Bild 3.13 sind die Phase des Metalls, das hier ein Einstoffsystem sei. Die Ausscheidungen stellen ebenfalls eine Phase dar. Bei Legierungen, in denen eine vollkommene Löslichkeit aller Metallkomponenten nicht möglich ist, treten innerhalb eines Korns mehrere Phasen als Mischphase auf, s. Abschnitt 5.1.

### 3.3.5 Einfluß von Struktur und Gefüge auf Festigkeit und Verformbarkeit

Festigkeit und Verformung eines kristallinen Stoffes sind, wie bereits erwähnt, von dessen Struktur und Gefüge abhängig.

Die im Idealkristall unter einer äußeren Kraft  $F$  entstehenden Verformungen zeigt Bild 3.15. Die Kraft  $F$  werde normal und parallel zur noch näher zu beschreibenden Ebene  $GE$  zerlegt. Gehen wir davon aus, daß die Kraft  $F$  geringer als die Trennfestigkeit ist, so ist für die plastische Verformung das Verhalten infolge der Schubkraft  $F_t$  maßgebend. Kleine Kräfte verzerren das Gitter elastisch und reversibel. Wird ein bestimmter Schwellenwert  $\text{crit } F_t$  überschritten, so tritt eine plastische Abgleitung ein. Diese findet in der Gleitebene  $GE$  statt; an der Oberfläche des Idealkristalls bilden sich Gleitstufen. Den geringsten Gleitwiderstand bieten die Ebenen mit der dichtesten Atombelegung; die Gleitung erfolgt entlang von Gleitlinien dichtester Packung. Bild 3.9 zeigt die

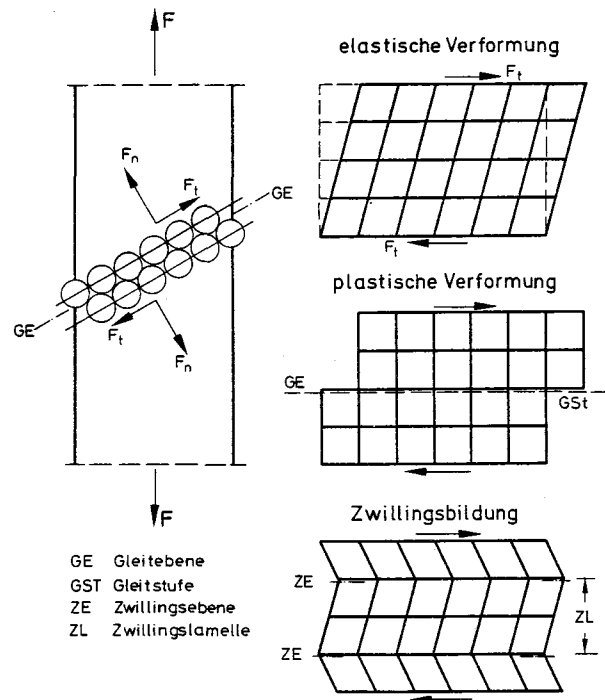


Bild 3.15 Plastische Abgleitung und Zwillingsbildung im Einkristall

bevorzugten Gleitdiagonalen der krz- und kfz-Gitter. Das kfz-Gitter besitzt eine größere Anzahl von Gleitmöglichkeiten als das krz-Gitter (Produkt: Gleitebene mal Gleitdiagonale), wodurch die bessere Kaltverformbarkeit von kfz-Metallen ( $\gamma$ -Eisen, Kupfer, Blei) erklärt wird.

Ein weiterer Mechanismus der Kristallplastizität ist die Bildung von Zwillingen. Dabei klappen bestimmte Bereiche des Gitters in eine spiegelbildliche Anordnung um. Die Zwillingsbildung ist mit geringeren plastischen Verformungen verbunden und tritt nur in hexagonalen Gittern auf.

Zum Abgleiten einer ungestörten Gitterebene ist eine theoretische Schubspannung

$$\text{theor } \tau \approx G/30$$

erforderlich, mit  $G$  = Schubmodul des Werkstoffs. Im Experiment tritt jedoch beim vielkristallinen realen Werkstoff das Abgleiten bereits bei einer viel geringeren Schubspannung ein. Für die plastischen Verformungen müssen also noch andere Wirkungen von Einfluß sein. Diese Wirkungen sind die Versetzungen, die mit erheblich geringerem Kraftaufwand eine Verschiebung der Atomebene ermöglichen.

Bild 3.16 zeigt die Abgleitung infolge Wanderns einer Stufenversetzung, die durch die mühelose Verschiebung einer Teppichfalte versinnbildlicht werden kann. Die Fortbewegung der Versetzungen findet bevorzugt auf den am dichtesten belegten Gleitebenen statt. Sie wandern nur selten bis zur Oberfläche des Vielkristalls, sondern werden mit zunehmender äußerer Kraft an Korngrenzen, Einschlüssen und anderen Hindernissen aufgestaut. Auf dieser Erscheinung beruht die Verfestigung metallischer Werkstoffe. Ist die Fortbewegung der Versetzungen und damit eine weitere plastische Gleitung unterbunden, so tritt die Werkstofftrennung, der Bruch, ein.

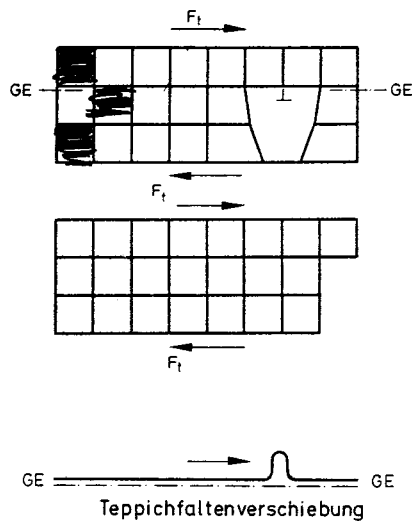


Bild 3.16 Plastische Verformung durch Wandern einer Stufenversetzung

## 3.4 Amorphe Stoffe

### 3.4.1 Definition und Begriffe

Im Gegensatz zu kristallinen Werkstoffen weist die Anordnung der Atome und Moleküle amorpher Werkstoffe keine geometrische Regelmäßigkeit auf. Im Gegenteil: Die Bausteine sind untereinander statistisch regellos verknüpft, können aber selbst eine kristalline Struktur besitzen (z. B.  $\text{SiO}_4$ -Tetraeder). Die amorphen Werkstoffe werden gelegentlich zusammenfassend als Gläser (ungeordneter fester Zustand = Glaszustand) bezeichnet. Im Gegensatz dazu wird hier eine Gliederung nach den diesbezüglichen Stoffgruppen der Technik vorgenommen. Hiernach unterscheidet man:

- Gläser
- Gele
- Polymere

### 3.4.2 Gläser

Gläser entstehen durch rasche Abkühlung aus der Schmelze, wodurch zur Bildung einer kristallinen Struktur nicht die notwendige Zeit verbleibt (unterkühlte Flüssigkeit). Ihre Struktur besteht z. B. aus Silizium-Sauerstoff-Bausteinen (i. a. Oxide von Erdmetallen), die lose, ungeordnete Netzwerke bilden. Gläser sind homogen und isotrop. Sie bilden nicht nur in den Baugläsern, sondern auch in allen anderen keramischen Baustoffen die wesentliche Stoffphase.

Das thermische Verhalten von Gläsern weist eine Verwandtschaft zu hochviskosen Flüssigkeiten auf. Ein eindeutiger Schmelzpunkt bzw. Erstarrungspunkt ist nicht vorhanden. Mit steigender Temperatur verweicht das Glas, seine Viskosität nimmt ab. Bild 3.17 zeigt das Erstarrungsverhalten von Glas im Vergleich zu einem kristallinen Stoff.

Die Festigkeit von  $\text{SiO}_4$ -Kettenstrukturen ist sehr hoch, sie wird jedoch durch Mikroinhomogenitäten und andere Bau-

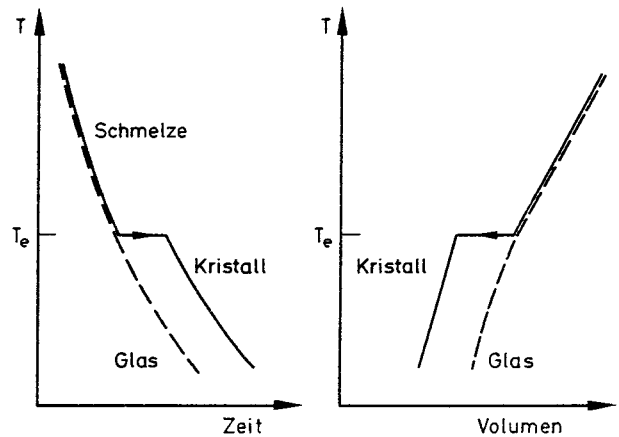


Bild 3.17 Vergleich des Erstarrungsverhaltens von Glas und einem kristallinen Stoff

fehler (Einlagerungen, Ausscheidungen, Poren) des realen Gefüges abgemindert. Die regellose Struktur ermöglicht weder eine Kristallplastizität noch Abgleitungen. Glas versagt deshalb bei Zugbeanspruchung ideal-spröde.

### 3.4.3 Gele

Gele sind Zweistoffgemenge, in denen Teilchen kolloidaler Größe in einer Flüssigkeit fein verteilt sind. Dabei sind weder Struktur noch Form des Teilchens von Belang, sondern nur dessen Größe. Bei Teilchen kolloidaler Größe ( $d < 10^{-4}$  mm) sind die Wechselwirkungskräfte zu den Flüssigkeitsmolekülen stärker als die Massenkraft des Teilchens: Die Teilchen bleiben in Schwebe, und es entsteht ein Sol. Wird dem Sol durch Trocknung und/oder chemische Bindung Flüssigkeit entzogen, so entsteht ein festes Netzwerk aus Teilchen, adsorbierten Flüssigkeitsfilmen und Poren, das Gel genannt wird. Neben chemischen Bindungen wird die Kohäsion hauptsächlich durch elektrostatische zwischenmolekulare Kräfte erzeugt (van der Waalsche Kräfte).

Die Gele besitzen im Bauwesen eine große Bedeutung. Manche Anstriche und Zementstein stellen Gele dar.

### 3.4.4 Porigkeit amorpher Mehrphasenstoffe

Als keramische Baustoffe bezeichnet man jene, die aus oxidischen Verbindungen der die Erdrinde bildenden Elemente Silizium, Aluminium, Calcium, Eisen u. a., bzw. auch aus deren Hydratphasen bestehen. Strukturell sind sie, zum mindesten in den Bindephasen, als Gläser oder Gele einzuordnen.

Von großer technischer Bedeutung sind hier die grobkeramischen Baustoffe Ziegel, Kalksandstein etc. und die Gruppe der Betone, Mörtel und Putze, die stets aus mehreren Stoffphasen bestehen. Diese Stoffe weisen als wesentliches Gefügemerkmal eine ausgeprägte Porigkeit auf, die entweder durch geschlossene Poren oder durch zusammenhängende, nach außen offene Kapillarporen gebildet wird. Die Porigkeit ist sowohl herstellungs- als auch gefüge-

bedingt (Brennporen in Ziegeln, Verdichtungsporen im Beton bzw. strukturelle Poren in Gelen). Sie übt nicht nur auf das mechanische Verhalten einen großen, im allgemeinen negativen Einfluß aus, sondern erlaubt darüber hinaus den Feuchtaustausch mit dem umgebenden Klima, sofern die Poren nach außen offen sind. Die offene Porosität beeinflusst also die Dichtigkeit und damit die Dauerhaftigkeit des Baustoffs. Die Entstehung und Beeinflussung der Porigkeit wird bei den genannten Stoffen näher besprochen.

### 3.4.5 Polymere

Unter Polymere versteht man amorphe Stoffe organischer Herkunft. Aus Einzelbausteinen (Monomere) werden hochmolekulare Faden- oder Ringketten gebildet. Die amorphen bzw. teilkristallinen Kunststoffe bestehen aus regellosen Fadenknäueln bzw. aus solchen mit bereichsweiser Parallelordnung der Fäden. Die Fadenketten sind mehr oder weniger quervernetzt. Die bituminösen Baustoffe Bitumen und Teer sind ebenfalls als Polymere zu bezeichnen. Sie stellen ein kolloiddisperses System von höhermolekularen Asphaltenen oder Harzen in einer niedermolekularen Grundmasse dar (Sol oder Gel). Das thermo-mechanische Verhalten der Polymere entspricht dem der Gläser. Der Vollständigkeit halber wird noch der Baustoff Holz erwähnt, der in struktureller Hinsicht auch als polymerer Stoff angesehen werden kann.

## 3.5 Verbundwerkstoffe

### 3.5.1 Definition und Begriffe

Ein Verbundwerkstoff entsteht durch Mischung von unterschiedlichen Phasen eines Werkstoffs oder von verschiedenen Werkstoffen, um auf diese Weise bestimmte Eigenschaften zu erzielen, die die Komponenten für sich nicht erbringen können.

Holz ist ein natürlicher Verbundwerkstoff, in dem die Zellulosefasern durch Lignin zum faserverstärkten Baustoff verbunden werden. Auch ein Randschichtgehärtetes metallisches Werkstück kann in diesem Sinn als Verbundwerkstoff angesehen werden, indem der Phase »harte Randschicht« die Aufgaben Härte und Verschleißwiderstand und der Phase »weicher Kern« die Aufgaben Bettung und Bruchzähigkeit zugewiesen werden.

### 3.5.2 Entwicklungsziele

Im Bauwesen wird mit der Entwicklung von Verbundwerkstoffen eine Reihe oft sehr unterschiedlicher Ziele verfolgt:

- Steigerung der Festigkeit, Steifigkeit und Bruchzähigkeit von keramischen und hochpolymeren Baustoffen
- Anisotropieausgleich von geschichteten, anisotropen Baustoffen zur Festigkeitserhöhung
- Herstellung von Mehrstoffverbunden mit mehreren Funktionen (Tragfähigkeit, Bauphysik, Korrosionsschutz, Gestaltung etc.)
- Steigerung der Wirtschaftlichkeit

Verbundwerkstoffe bestehen aus mehreren Phasen, die chemisch untereinander verträglich sind bzw. an den Phasengrenzen nicht miteinander reagieren. Die Bindung zwischen den Phasen beruht stets auf zwischenmolekularen Kräften (Adhäsion), die einen festen Haftverbund erzeugen müssen.

### 3.5.3 Arten und Gefüge

Nach dem Gefügebau sind folgende Arten von Verbundwerkstoffen zu unterscheiden, wobei die Bilder 3.18 bis 3.20 typische Beispiele zeigen:

#### Faserverbunde

In die Grundmatrix des zu verstärkenden Werkstoffs werden orientierte oder regellos verteilte Fasern zur Festigkeits- und Zähigkeitssteigerung eingebettet, s. Bild 3.18.

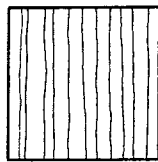
#### Schichtverbunde

Sie bestehen aus mehreren Schichten eines Stoffes oder verschiedener Stoffe, s. Bild 3.19, um entweder stoffbedingte Anisotropie auszugleichen oder um Mehrfachfunktionen zu erfüllen.

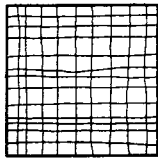
#### Disperse Verbunde

In die Grundmatrix wird dispers verteilt eine andere Stoffphase eingebaut, s. Bild 3.19, um die Festigkeit und Steifigkeit des Mehrphasenstoffs zu beeinflussen.

Die heute sehr verbreiteten Verbundwerkstoffe Stahlbeton und Spannbeton, s. Bild 3.20, sind als orientierte Faserarmierungen der Grundmatrix Beton anzusehen, der selbst ein Zweistoffverbundsystem darstellt (Zementstein + Zuschläge). Die im Vergleich zur Druckfestigkeit sehr niedrige Zugfestigkeit des Betons wird durch Bewehrungsstäbe aus Stahl kompensiert, die im Falle des Einreißen des Betons die Zugkräfte übernehmen. Beim Spannbeton wird z. B. durch Spannen von Spannstahl gegen den Beton ein Eigenspannungszustand eingeprägt, der das Einreißen des Betons infolge Belastung verhindert oder zumindest verzögert.



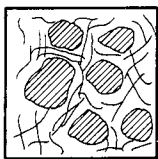
unidirektionale, lange Fasern in Matrixphase  
Beispiel: glasfaserverstärkte Kunststoffe GFK



mehrrachsige Faseranordnung in Matrixphase  
Beispiel: GFK und armierte Membranstoffe

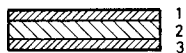


zufällig orientierte Fasern in Matrixphase  
Beispiel: GFK und andere armierte Kunststoffe

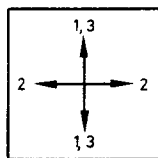


kurze regellose Fasern in Mehrphasenstoff  
Beispiel: Stahlfaserbeton

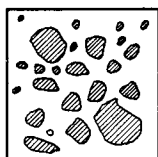
Bild 3.18 Gefüge von Faserverbundwerkstoffen



Schichtverbunde für Anisotropieausgleich und Mehrfachfunktionen



Beispiele: Sperrholz  
ausgeschäumtes Trapezblech  
beschichtete Stoffe



Dispers verteilte Phase in Matrixphase  
Beispiele: Beton, Mörtel, Putz  
Dispersionsfarbe  
gefüllte Kunststoffe

Bild 3.19 Gefüge von Schichtverbunden und dispersen Verbundstoffen

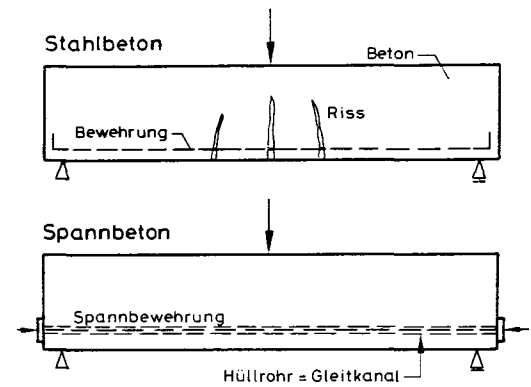


Bild 3.20 Verbundwerkstoffe Stahlbeton und Spannbeton mit nachträglichem Verbund

### 3.6 Literatur

- [1] Hornbogen, E.: Werkstoffe. Springer-Verlag, 1973.
- [2] Schatt, W.: Einführung in die Werkstoffwissenschaft. Deutscher VEB-Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig. 3. Auflage, 1978.
- [3] Stüwe, H.-P.: Einführung in die Werkstoffkunde. B.I.-Hochschultaschenbücher, Band 467, Bibliographisches Institut Mannheim/Wien/Zürich, 2. Auflage, 1978.
- [4] Schlenker, B. R.: Einführung in die strukturorientierte Werkstoffkunde. R. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 1975.
- [5] Bargel, H.-J., und Schulze, G.: Werkstoffkunde. Hermann Schroedel Verlag KG, Hannover etc., 1978.
- [6] Ralls, K. M., Courtney, T. H., und Wulff, J.: Introduction to materials science and engineering. John Wiley & Sons, New York, 1976.
- [7] Moffat, W. G., Pearsall, G. W., und Wulff, J.: The structure and properties of materials. Vol. I, Structure. John Wiley & Sons, New York, 1964.
- [8] Salmang, H., und Scholze, H.: Die physikalischen und chemischen Grundlagen der Keramik. Springer-Verlag, 5. Auflage, 1968.
- [9] Henning, O., und Knöfel, D.: Baustoffchemie. Bauverlag GmbH Wiesbaden und Berlin, 2. Auflage, 1978.
- [10] Illschner, B.: Werkstoffwissenschaften. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1982.

# 4 Grundlagen des Baustoffverhaltens

## 4.1 Mechanisches Verhalten

### 4.1.1 Einsatz und Beanspruchung von Baustoffen

Unter dem mechanischen Verhalten eines Baustoffs versteht man dessen Reaktionen auf mechanische Spannungen. Dabei interessiert das Verhalten im gesamten Bereich der Beanspruchbarkeit, angefangen vom Gebrauchszustand eines Bauteils bis zu dessen Versagen. Für die Konstruktionsbaustoffe, aus denen Tragwerke geformt werden, sind das Verformungsverhalten und die Festigkeit vorrangig wichtig, weil Kräfte und Spannungen mit befriedigender Sicherheit zum Schutz von Leben und Gütern aufgenommen werden müssen.

### 4.1.2 Mechanische Größen

Größe	Zeichen	SI-Einheit	bisher übliche Einheit	Faktor zur Umrechnung in SI-Einheit
Normal- oder Längsspannung	$\sigma$	$\text{N/mm}^2 = \text{MN/m}^2$	$\text{kp/cm}^2$	0,1
Schubspannung	$\tau$	$\text{N/mm}^2 = \text{MN/m}^2$	$\text{kp/cm}^2$	0,1
Dehnung	$\varepsilon$	—	—	1
Gleitung, Gleitwinkel	$\gamma$	—	—	1
Elastizitätsmodul	$E$	$\text{N/mm}^2$	$\text{kp/cm}^2$	0,1
Schubmodul	$G$	$\text{N/mm}^2$	$\text{kp/cm}^2$	0,1
Querkontraktionszahl	$\mu$	—	—	1
Elastizitätsgrenze	$\sigma_E$	$\text{N/mm}^2$	$\text{kp/cm}^2$	0,1
dynamische Viskosität	$\eta$	$\text{Pas} = \text{Ns/m}^2$	Poise	10
Bruchspannung	$\sigma_B, \max \sigma$	$\text{N/mm}^2$	$\text{kp/cm}^2$	0,1
Fließ- oder Streckgrenze	$\sigma_F \text{ od. } \sigma_S$	$\text{N/mm}^2$	$\text{kp/cm}^2$	0,1
Bruchdehnung	$\varepsilon_U, \max \varepsilon$	[—]	[—]	1
Ober-, Unter-, Mittelspannung	$\sigma_o, \sigma_u, \sigma_m$	$\text{N/mm}^2$	$\text{kp/cm}^2$	0,1
Spannungsverhältnis	$R = \sigma_u / \sigma_o$	[—]	[—]	1
Lastspielzahl	$N$	[—]	[—]	1
Dauerschwingamplitude	$\sigma_A$	$\text{N/mm}^2$	$\text{kp/cm}^2$	0,1
Dauerfestigkeit	$\sigma_D = \sigma_m \pm \sigma_A$	$\text{N/mm}^2$	$\text{kp/cm}^2$	0,1

### 4.1.3 Zur Entstehung von Beanspruchungen

Spannungen (Beanspruchungen) können im Tragwerk oder in Bauteilen des Ausbaus usw. auf vielfältige Weise entstehen. Das Eigengewicht des Bauteils, die Nutz- oder Verkehrslast, der Wind und andere erzeugen Lastspannungen [N 1]. Daneben treten auch lastunabhängige Spannungen auf, deren Ursachen und Wirkungen im folgenden erläutert werden.

Ursache vieler Bauschäden sind die oft »vergessenen« Zwangspannungen. Zwang entsteht, wenn ein Bauteil behindert wird, eine Eigenverformung, z. B. eine Wärmeausdehnung, frei, also zwanglos, auszuführen. Durch die Behinderung werden Kräfte, der Zwang, geweckt. Auch Setzungen erzeugen Zwang.

$w$   $\text{N/m}^2$  Druckkraft  
 $E$   $\text{N/mm}^2$  Kraft  
 $G$   $\text{m [kg]}$  Gewicht / Masse

$$! G = m \cdot g !$$



Die Beispiele von Bild 4.1.1 dienen der Erklärung von Last und Zwang: Der Stahlbetonbalken ist durch Lasten beansprucht. Die oft beobachteten Risse in frisch entschalteten Kellerwänden aus Beton in kühler Jahreszeit hingegen sind die Folge von Zwang: Die ältere Sohle behindert die angestrebte Temperatur- und Schwindverkürzung der Kellerwand, hält sie gewaltsam auf Länge. Dadurch entsteht ein Zwang, der die Zugfestigkeit des Betons überwindet und zu Rissen führt.

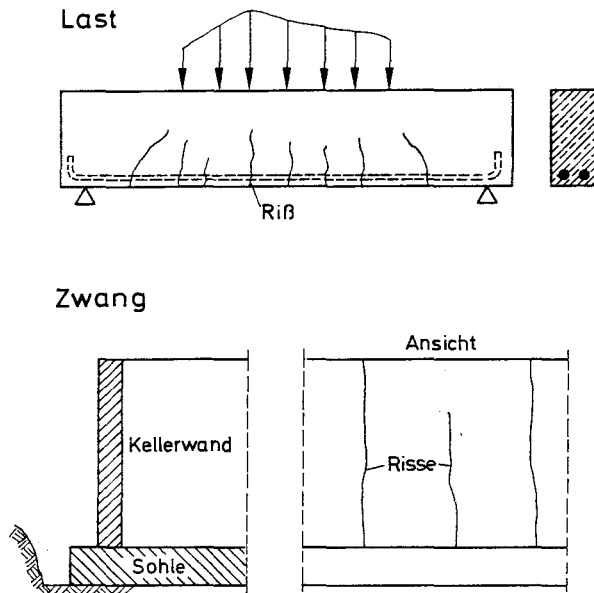


Bild 4.1.1 Risse infolge Last oder Zwang-Beispiel

Die dritte Hauptgruppe der Spannungen sind die Eigen-spannungen, die dadurch entstehen, daß bei einem Ausgleichsprozeß – z. B. als Folge einer Temperaturänderung – die Temperatur ungleichförmig über den Querschnitt eines Bauteils verteilt ist. Damit haben die einzelnen Fasern des Stoffes das Bestreben, sich entsprechend der Temperaturverteilung zu dehnen. Durch den stofflichen Zusammenhalt werden sie jedoch daran gehindert, es entsteht ein innerer

Zwang, verbunden mit Eigenspannungen. Bild 4.1.2 zeigt am Beispiel der Kellerwand die Entstehung: Die Kellerwand behielt durch die Schalung einen Teil der Betonabbinde-wärme. Durch das Entschalen entsteht ein Temperaturschock. Die Außenfasern wollen sich verkürzen, können es aber nicht. Die Folge sind Zugspannungen in den Außenfasern, die zu den bekannten Netzzissen führen.

Die Beispiele für Zwang und Eigenspannungen ließen sich beliebig fortsetzen. Temperaturänderungen, Schwinden und Quellen saugfähiger Stoffe führen stets zu Eigenspannungen. Auch Schweißspannungen sind Eigenspannungen. Viele Bauteile weisen bereits vor Einbau Eigenspannungen auf, die durch den Fertigungsprozeß entstanden sind. Häufig entstehen Eigenspannungen in Verbundwerkstoffen, wenn sich die Einzelstoffe unterschiedlich thermisch dehnen. Das mechanische Verhalten eines Stoffes wird von Temperatur und Zeit nachhaltig geprägt. Kristalline Baustoffe wie Stahl verweichen bei den hohen Temperaturen des Brandfalls. Bei thermoplastischen Kunststoffen sind ebenfalls bestimmte Gebrauchstemperaturen einzuhalten. Der Zeiteinfluß beinhaltet die vielfältigen Arten des zeitlichen Einwirkens von Spannungen.

Eigengewicht und Verkehrsnutzlast erzeugen im Hochbau eine vorwiegend ruhende Beanspruchung, so daß statische Bedingungen vorliegen. Bild 4.1.3 zeigt schematisch für eine Hochbaustütze, wie die Spannung aus Eigengewicht mit der Fertigstellung der Geschosse ansteigt. Die später hinzutretende Verkehrslast  $p$  erzeugt Spannungsaus-schläge, die in der Regel eine gewisse Zeit einwirken, so daß wir die Spannungs-Zeitgeschichte durch eine konstante Spannungszeitlinie umhüllen dürfen. Die Zeitfunktion der Spannungen kann dabei sehr unterschiedlich verlaufen.

Bei Verkehrsbauwerken, z. B. einer Brücke, treten größere und häufigere Spannungsaus-schläge als im Hochbau auf. Wir sprechen von einer vorwiegend nichtruhenden Beanspruchung. Ähnliches gilt für ein Treppengeländer oder eine eingespannte Werksteintreppstufe usw. Auch hier müssen wir vereinfachen: Wir stellen die schwingende Beanspruchung durch eine Mittelspannung (z. B. aus Eigengewicht) und diese überlagernden Spannungswellen dar (Bild 4.1.4).

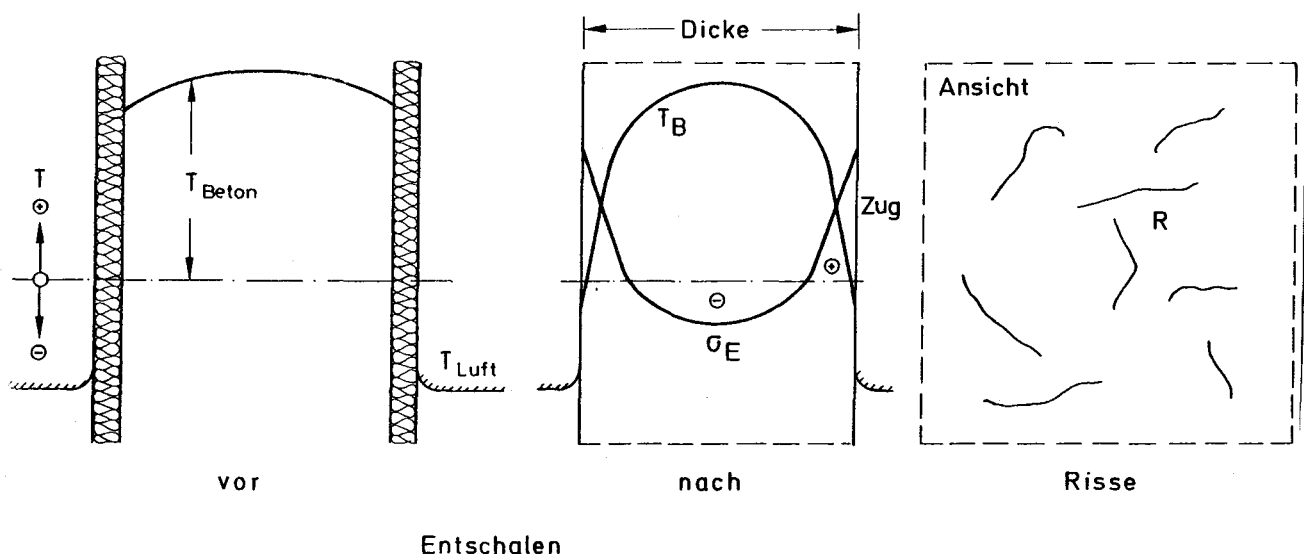


Bild 4.1.2 Entstehung von Eigenspannung (Beispiel plötzliche Abkühlung)

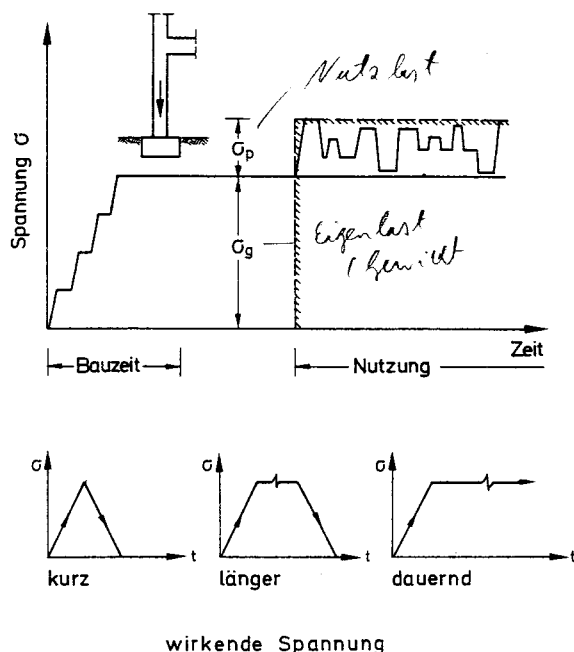


Bild 4.1.3 Ruhende oder statische Beanspruchung

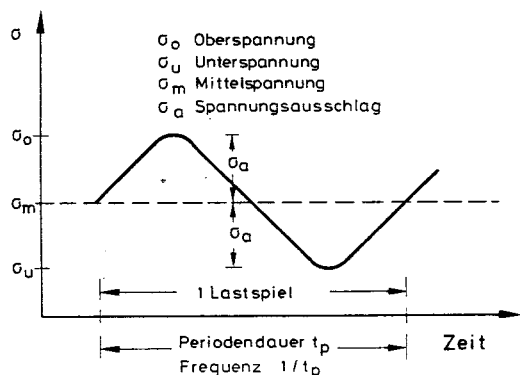


Bild 4.1.4 Zeitverlauf der Spannung bei schwingender Beanspruchung

Sowohl bei der statischen als auch bei der schwingenden Beanspruchung gehen wir davon aus, daß an allen Punkten des Bauteils die Spannungen dem gleichen Zeitpfad wie die Kräfte folgen (quasistatische Bedingung). Bei einer Stoßbelastung, z.B. durch Erdbeben, ist die Lasteinwirkungsdauer sehr kurz. Damit ist aber auch ein Zeitvershub zwischen Ursache und Wirkung gegeben. Das mechanische Verhalten kann nachhaltig verändert werden. Im folgenden wird das mechanische Verhalten der Baustoffe in gedrängter Form besprochen. Vertiefende Informationen sind der Fachliteratur [1 bis 15] zu entnehmen.

## 4.1.4 Grundarten der Beanspruchung

### 4.1.4.1 Einachsige Beanspruchung

Ein Tragwerk antwortet auf äußere Lasten mit inneren Kräften und Verformungen. In einem Fachwerkträger z.B. entstehen Stabkräfte (Bild 4.1.5). Eine Stabkraft wirkt in kon-

stanter Größe über die Stablänge; sie ist parallel zur Stabachse und greift im Schwerpunkt des Stabquerschnitts an. Damit wird der Stab mittig und einachsig beansprucht (einachsiger Spannungszustand).

Betrachten wir nun die Diagonale ②, die durch die Zugkraft Z beansprucht wird und die die Querschnittsfläche  $A_0$  besitzt (Bild 4.1.6). Führt man einen Schnitt normal zur Stabachse, so erfordert das Gleichgewicht der Kräfte das Anbringen von inneren Kräften pro Flächeneinheit an beiden Schnittflächen, die man Normalspannungen  $\sigma_l$  nennt:

$$\sigma_l = \frac{Z}{A_0} \quad \begin{array}{l} (+) \text{ Z Zugkraft} \\ (+) \sigma_l \text{ Zugspannung} \end{array} \quad (4.1.1)$$

Die Normalspannungen sind gleichmäßig über den Querschnitt verteilt und wirken normal zu diesem bzw. parallel, aber entgegengesetzt zur Kraft Z (der Index »l« kennzeichnet die Wirkungsrichtung, die der Längsachse entspricht).

Führt man einen zur Stabachse schräg gerichteten Schnitt, so wird zum Gleichgewicht eine Schrägspannung p benötigt, die auf der nun größeren Schrägfläche  $A_0/\cos \varphi$  wirkt (Bild 4.1.7). Man kann aber die wenig anschauliche Schrägspannung p in zwei Komponenten zerlegen. Die eine Komponente wirkt normal zum Schrägschnitt, ist also wieder eine Normalspannung  $\sigma$ . Die andere Komponente hingegen wirkt parallel zum Schrägschnitt und wird als Schubspannung  $\tau$  bezeichnet. Diese Spannungen  $\sigma, \tau$  greifen auch an einem am Schrägschnitt liegenden Volumenelement an. Man erkennt, daß die Schubspannungen paarweise und entgegen gerichtet am Element angreifen müssen, weil sonst weder das Gleichgewicht gegen Verschieben noch gegen Verdrehen gewährleistet wäre.

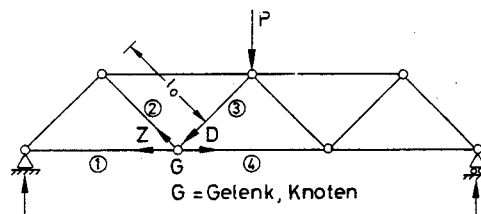


Bild 4.1.5 Äußere und innere Kräfte beim Fachwerk

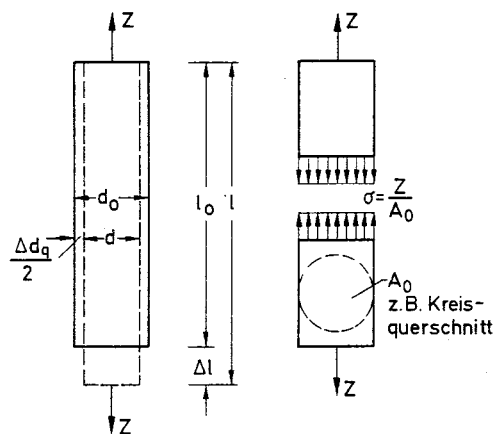


Bild 4.1.6 Spannungen und Verformungen bei einachsiger Zug

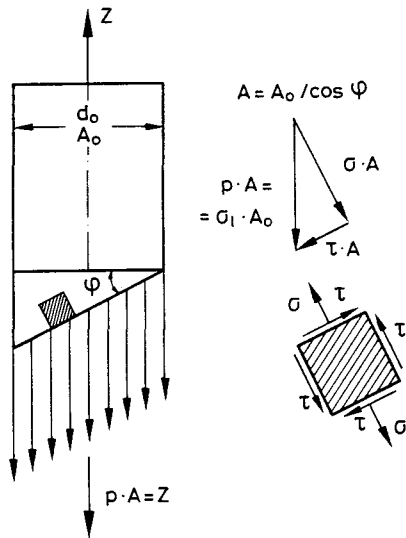


Bild 4.1.7 Spannungen im Schrägschnitt beim einachsigen Zug

Zwischen der angreifenden Spannung  $\sigma_l$  und den Spannungen  $\sigma$ ,  $\tau$  gilt der Zusammenhang:

$$\begin{aligned}\sigma &= p \cos \varphi = \sigma_l \cos^2 \varphi \\ \tau &= p \sin \varphi = \sigma_l \sin \varphi \cos \varphi\end{aligned}\quad (4.1.2)$$

Hieraus erkennt man, daß der Größtwert von  $\sigma$  bei  $\varphi = 0$  auftritt; dann ist nämlich

$$\begin{aligned}\max \sigma &= \sigma_l = \sigma_1 \\ \tau &= 0\end{aligned}\quad (4.1.3)$$

Man bezeichnet  $\sigma_1$  als Hauptspannung; sie entspricht bei einachsiger Beanspruchung der Spannung  $\sigma_l$ . Der Größtwert von  $\tau$  tritt im unter  $45^\circ$  geneigten Schnitt auf:

$$\begin{aligned}\max \tau &= \frac{\sigma_l}{2} \\ \text{und} \\ \sigma &= \frac{\sigma_l}{2}\end{aligned}\quad (4.1.4)$$

Der Zusammenhang (4.1.2) wird üblicherweise im sog. Mohrschen Spannungskreis dargestellt. Näheres s. in [14].

Die Grundbegriffe der Verformungen werden am Beispiel der Diagonale ② erläutert, die vor Belastung die Ausgangslänge  $l_0$  besitzen möge. Infolge der Kraft  $Z$  erfährt sie die zunächst noch unbekannte Verlängerung von

$$\Delta l = l - l_0 \quad (+) \text{ Verlängerung} \quad (4.1.5)$$

wobei  $l$  die verformte Länge darstellt. Für den Vergleich mit Versuchswerten oder mit Kennwerten aus Normen u. a. ist es sinnvoll, die Verlängerung  $\Delta l$  auf die Ausgangslänge  $l_0$  zu beziehen. Damit erhalten wir die Längsdehnung

$$\epsilon_l = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \begin{array}{l} (+) \text{ Zugdehnung} \\ (-) \text{ Druckdehnung} \end{array} \quad (4.1.6)$$

Die Dehnung stellt, ebenso wie die Spannung, eine bezogene Größe dar, mit der man von den Abmessungen unabhängig wird.

Bei Verlängerung des Stabes zieht sich der Querschnitt um  $\Delta d_q$  zusammen. Bezogen auf den Ausgangsdurchmesser  $d_0$  des Stabes erhalten wir die Querdehnung:

$$\epsilon_q = \frac{\Delta d_q}{d_0} \quad \begin{array}{l} (-) \epsilon_q \text{ bei Längszug} \\ (+) \epsilon_q \text{ bei Längsdruck} \end{array} \quad (4.1.7)$$

Versuche lehren, daß das Verhältnis  $|\epsilon_q/\epsilon_l|$  im Bereich elastischer Verformungen eine Werkstoffkonstante darstellt, die Querkontraktionszahl genannt wird:

$$\mu = \left| \frac{\epsilon_q}{\epsilon_l} \right| \quad \begin{array}{l} \mu = \frac{1}{3} \text{ für Stahl} \\ \mu = 0,2 \text{ für Beton} \end{array} \quad (4.1.8)$$

Wegen der mit der Querdehnung verbundenen Querschnittsverminderung steigt streng genommen auch die Spannung an, ein Effekt, der zumindest im Bereich der Gebrauchsspannungen unwichtig ist.

Die vorstehenden Erläuterungen gelten für Spannung und Dehnung im Druckstab ③ gleichermaßen. Die Spannung  $\sigma_l$  wird zur Druckspannung und besitzt negatives Vorzeichen;  $\epsilon_l$  wird zur Druckdehnung, ist also negativ. Die Einheiten zeigt Tabelle 4.1.1.

Die Beziehungen (4.1.6) und (4.1.7) gelten für Normalspannungen ganz allgemein. Auch Schubspannungen führen zu Verformungen, nämlich zu Winkeländerungen am Element bzw. zu Gleitungen, die in Bild 4.1.10 dargestellt sind.

#### 4.1.4.2 Mehrachsige Beanspruchung

Einachsige Beanspruchungen treten in gelenkig angeschlossenen Stäben, in Seilen, seltener in Biegeträgern auf. Die Tragwerke sind in der Regel zwei- oder dreiaxial beansprucht. Die zweiaxiale Beanspruchung, bei der ein Stoffelement durch normal zueinander gerichtete Spannungen beansprucht ist, läßt sich am Beispiel eines Druckbehälters schildern (Bild 4.1.8). Da der Innendruck  $p_i$  auf Wand und Deckel wirkt, erfährt ein Wandausschnitt (Stoffelement) Längs- und Ringzug.

Bei der dreiaxialen Beanspruchung sind alle Seiten eines Elements durch Spannungen beaufschlagt. Durch die Spannungsmehrachsigkeit, ausgedrückt durch Größe und Vorzeichen der Spannungen, werden das Verformungsverhalten und die Festigkeit beeinflusst.

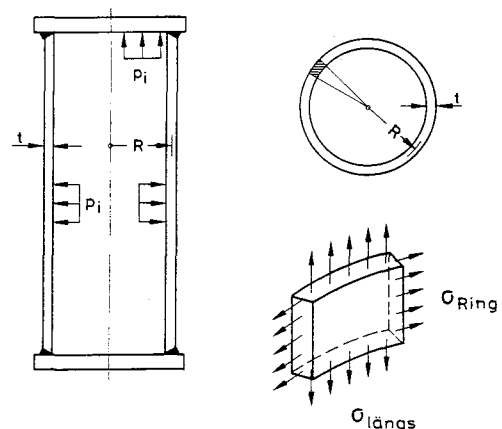


Bild 4.1.8 Zweiachsiger Spannungszustand; Beispiel Druckbehälter

#### 4.1.4.3 Häufige Beanspruchungsfälle

Die Erläuterungen zur ein- und mehrachsigen Beanspruchung werden nachfolgend an einigen Beanspruchungsfällen ergänzt, die später im Zusammenhang mit der Baustoffprüfung erwähnt werden.

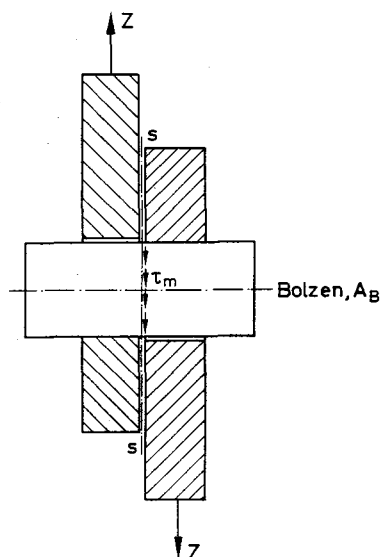
### *Schub und Scheren*

Die Entstehung der Schubspannungen ist bereits in Abschnitt 4.1.4.1 geschildert worden. Die Kraftüberleitung durch Schub tritt in der Praxis häufig bei Niet-, Schrauben-, Nagel- und Dübelverbindungen auf. Wird z. B. die Diagonale ② über ein Blech und einen Schraubenbolzen an das Knotenblech des Obergurts angeschlossen, so wirken im Bolzen im lotrechten Schnitt s-s (Bild 4.1.9) die mittleren Schubspannungen

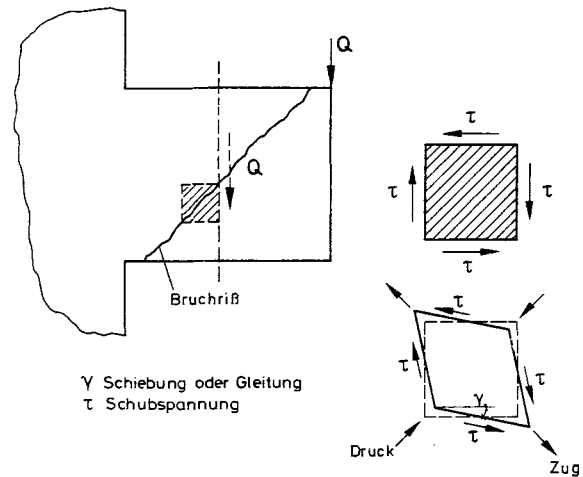
$$\tau_m = \frac{Z}{A_B}$$

Weil der Bolzen auf Abscheren beansprucht wird, ist in diesem Fall auch die Bezeichnung Scherspannung üblich.

Die Wirkung des Schubes wird auch bei einer Konsole deutlich (Bild 4.1.10). Die Schub- oder Querkraft ist in jedem lotrechten Schnitt gleich der Konsollast. Sie erzeugt die mittlere Schubspannung  $\tau_m$  entlang der Konsolenhöhe. Schneiden wir ein Elementteilchen heraus, so erkennen wir, daß zur lotrechten Schubspannung auch eine gleich große, waagerechte gehört. Andernfalls wäre das Gleichgewicht gegen Verdrehen des Teilchens nicht eingehalten. Aus der Verformung des Elements läßt sich ableiten, daß die Wirkung des Schubes durch Druck- und Zugkräfte dargestellt werden kann, die in um  $45^\circ$  verschwenkten Ebenen angreifen. Ein Werkstoff wie unbewehrter Beton, druckstark aber zugschwach, wird also nicht lotrecht abscheren, sondern in einer unter  $45^\circ$  geneigten Ebene auf Zug versagen (Bruchriß). Schub ist bereits ein zweiachsiger Spannungszustand.



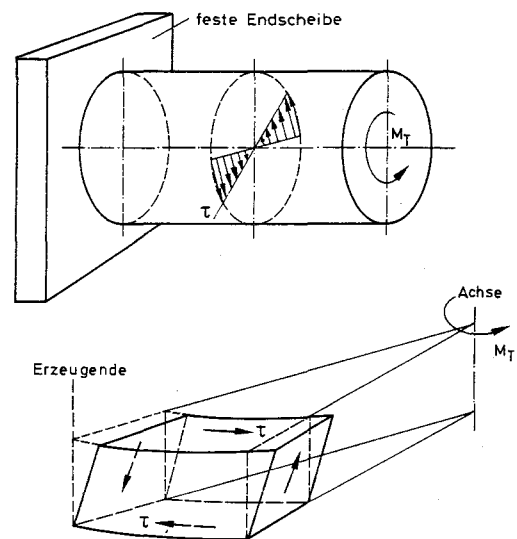
**Bild 4.1.9** Schub und Scheren im Bolzen



*Bild 4.1.10* Schub in einer Konsole

## Verdrehen

Spannungen und Verformung infolge eines Verdreh- oder Torsionsmoments  $M_T$  lassen sich anschaulich am zylindrischen Stab darstellen (Bild 4.1.11), der an einem Ende eingespannt, am anderen belastet sei. Die Verformung zweier benachbarter Kreisquerschnitte besteht aus einer Winkeldrehung. Die Erzeugenden gehen dabei in eine Schraubenlinie über. Auch bei Torsion treten die Schubspannungen in zueinander senkrechten Schnitten auf.



**Bild 4.1.11** Torsion beim Kreiszylinder

*Biegung*

Bei Biegetraggliedern (z. B. Platte, Balken, Kragarm) rufen die Querlasten als innere Kräfte Biegemomente und Querkräfte hervor. Am Beispiel des Kragbalkens (Bild 4.1.12) erkennen wir, daß durch das Biegemoment  $M = x \cdot P$  an der Stelle  $y$  BiegeNormalspannungen auftreten, die aber aus Gleichgewichtsgründen nicht konstant über den Querschnitt, sondern verschränkt verteilt sind: In der oberen Balkenhälfte herrscht Zug, in der unteren Druck. Die Größtwerte treten in den Randfasern auf. In der Mittelfaser, neutrale Faser genannt, ist die Spannung null. Damit entstehen

aber auch in der oberen Hälfte Zug-, in der unteren Druckdehnungen, ein Balkenstückchen wird verkrümmt. Die Querkraft  $Q = P$  erzeugt Schubspannungen, die parabolisch über die Balkenhöhe verteilt sind und in gleicher Größe auch horizontal wirken. Die Last  $P$  hat das Bestreben, den Stab an jeder Stelle abzuscheren. Damit herrscht aber bei Biegung und Querkraft ein zweiachsiger Spannungszustand  $[\sigma, \tau]$ . Für das Versagen des Bauteils ist ggf. nicht die Spannung in der Randfaser, sondern an einer beliebigen anderen Stelle maßgebend, an der infolge der Kombination  $[\sigma, \tau]$  eine maximale Spannung, als Hauptspannung bezeichnet, auftritt. Bezüglich dieses Problems der Festigkeitslehre sei auf die Fachliteratur verwiesen [3, 9].

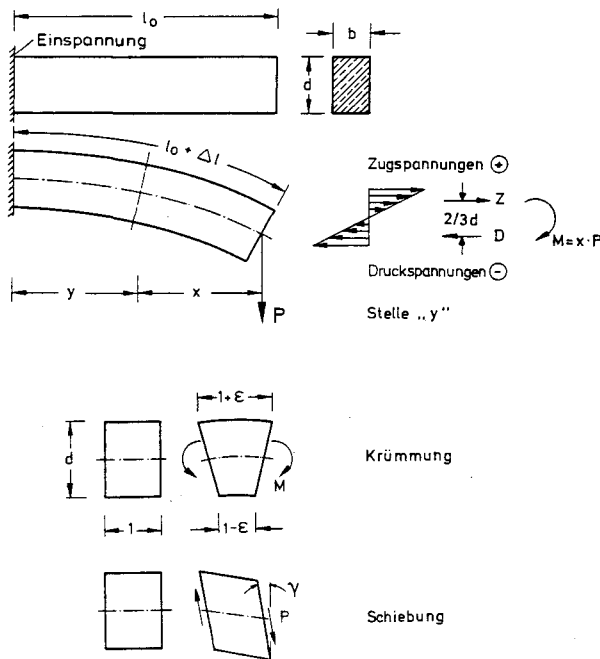


Bild 4.1.12 Spannungen und Verformungen bei Biegung

#### 4.1.5 Die Arten idealen Verformungsverhaltens

Beanspruchungen rufen Verformungen hervor und stehen mit diesen in einer Beziehung, die auch von der Zeit und Temperatur beeinflusst sein kann. Diese Beziehung nennen wir das Verformungsverhalten, das wir idealisierend nach folgenden Grundformen ordnen:

- Elastizität
- Plastizität
- Viskosität
- Viskoelastizität

Daneben sind durch Kombination auch noch weitere Formen denkbar. Während die Elastizität nur federnde Verformungen beinhaltet, ist die Plastizität auch noch mit bleibenden Verformungen verbunden; beide Grundformen sind zeitunabhängig. Die Viskosität ist zwar eine Eigenschaft von Flüssigkeiten, aber manche Baustoffe zeigen ein fluid-ähnliches, zeitabhängiges Verhalten. Viskosität und Viskoelastizität sind zeitabhängige Grundformen des Verformungsverhaltens.

##### 4.1.5.1 Elastizität

Ein Werkstoff ist elastisch, wenn die infolge einer Spannung entstandene Dehnung nach Fortnahme der Spannung wieder vollständig verschwunden ist (Bild 4.1.13). Be- und Entlastungslinie decken sich, eine bleibende Dehnung tritt nicht auf. Besteht außerdem zwischen Spannung und Dehnung ein linearer, also proportionaler Zusammenhang, so bezeichnen wir den Stoff als linear-elastisch. Er folgt dann dem Hooke'schen Gesetz:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \text{ bzw. } \epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (4.1.9)$$

Der Proportionalitätsfaktor  $E$  wird als Elastizitätsmodul bezeichnet. Der E-Modul nimmt mit Temperaturzunahme ab und umgekehrt. Da die Dehnung die Einheit 1 aufweist, besitzt  $E$  die Einheit einer Spannung. Der E-Modul stellt die Steigung der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Geraden dar und ist somit ein Maß für die Steifheit eines Stoffes: je steiler die Gerade, umso größer ist  $E$  und umso steifer ist der Stoff. Das Hooke'sche Gesetz läßt sich durch den Idealkörper der Feder darstellen, die Federkennzahl ist dabei der E-Modul.

Die meisten Konstruktionsbaustoffe zeigen im Bereich der Gebrauchsspannungen ein annähernd elastisches Verhalten. Bild 4.1.14 zeigt die E-Moduln einiger Baustoffe.

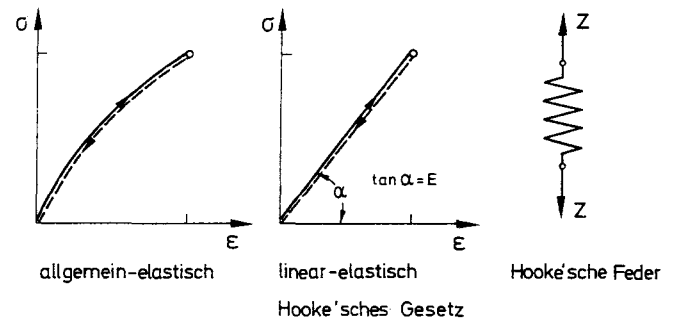


Bild 4.1.13 Elastisches Verformungsverhalten

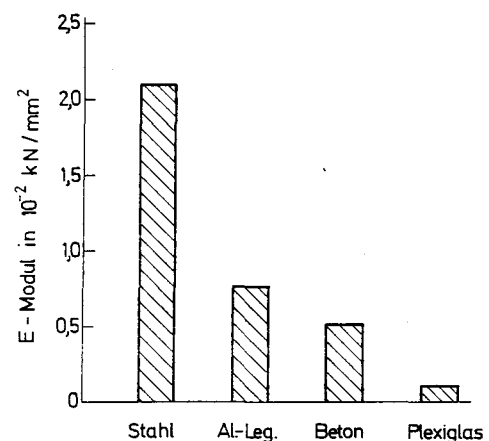


Bild 4.1.14 Elastizitätsmoduln einiger Baustoffe

Die Bedeutung des E-Moduls für die Verformbarkeit der Bauteile unterstreicht Bild 4.1.15: Weil der E-Modul von Stahl mit  $210 \text{ kN/mm}^2$  rd. dreimal so groß ist wie der von Aluminium, biegt sich der Konsolträger aus Aluminium auch dreimal so stark durch, denn mit dem Hooke'schen Gesetz

kann man auch den Zusammenhang zwischen der Last  $P$  und der Durchbiegung  $f$  darstellen:

$$f = \frac{P}{E} \cdot K \quad \text{mit } K = \frac{l^3}{3J}$$

Die Gebrauchsfähigkeit der Bauteile verlangt, daß die Verformungen vornehmlich elastischer Natur sind (Gründe: Formtreue, Passung, Geradheit, Freiheit von bleibender Deformation und anderes mehr).

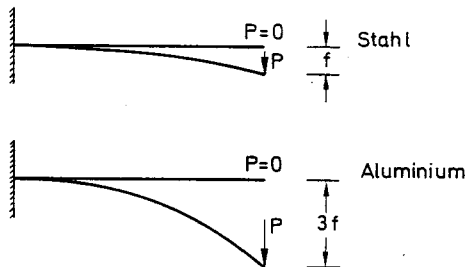


Bild 4.1.15 Einfluß des E-Moduls auf die Verformung

Das Hooke'sche Gesetz für die Schubbeanspruchung lautet (Bild 4.1.10):

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (4.1.10)$$

Hierin ist  $\gamma$  der Gleitwinkel und  $G$  der Schubmodul, der mit dem E-Modul wie folgt verknüpft ist:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (4.1.11)$$

Hierin ist  $\mu$  die Querkontraktionszahl, die bereits in Abschnitt 4.1.4.1 definiert worden ist und die im Bereich elastischen Verhaltens ebenso wie  $E$  und  $G$  eine baustoffabhängige Kenngröße ist.

Bei stetiger Belastung des Zugstabes ② (Bild 4.1.6) von null auf die Kraft  $Z$  verrichtet die Kraft entlang dem entstehenden Weg  $\Delta l$  die elastische Formänderungsarbeit  $W_{el}$ . Die elastische Formänderungsarbeit kann als Fläche unterhalb des geradlinigen Kraft-Verlängerungs-Diagramms zu

$$W_{el} = \frac{Z \cdot \Delta l}{2} \quad (4.1.12)$$

abgelesen werden (Bild 4.1.16). Ersetzen wir  $Z$  bzw.  $\Delta l$  durch  $\sigma$  bzw.  $\epsilon$ , und beziehen wir die Gesamtarbeit auf das Stabvolumen  $V = l_0 \cdot A_0$ , so erhält man die spezifische, elastische Formänderungsarbeit (-energie) zu:

$$w_{el} = \frac{W_{el}}{l_0 A_0} = \frac{\sigma_l \epsilon_l}{2} = \frac{\sigma_l^2}{2E} \quad (4.1.13)$$

Die elastische Formänderungsenergie ist im elastischen Baustoff gespeichert und wird bei Entlastung verlustfrei wiedergewonnen.

Die Beobachtung zeigt, daß manche elastische Baustoffe eine zeitabhängige Entwicklung der elastischen Dehnungen aufweisen und damit nicht mehr streng idealelastisch sind (Bild 4.1.17). Nach Erreichen der Spannung folgt ein Teilbetrag der Gesamtdehnung verzögert-elastisch nach. Nach Wegnahme der Spannung federt eben dieser Teilbetrag verzögert-elastisch zurück. Dementsprechend wird ein derartiges Verhalten als verzögert-elastisch oder anelastisch

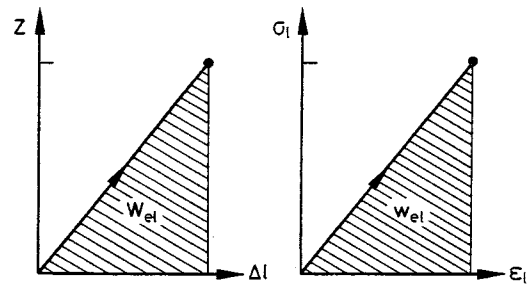


Bild 4.1.16 Elastische Formänderungsenergie

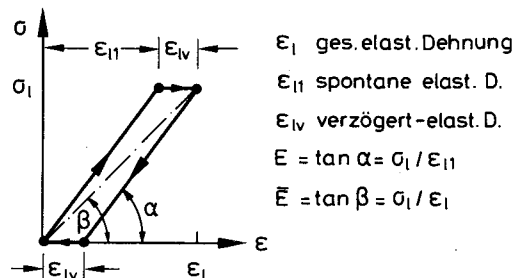
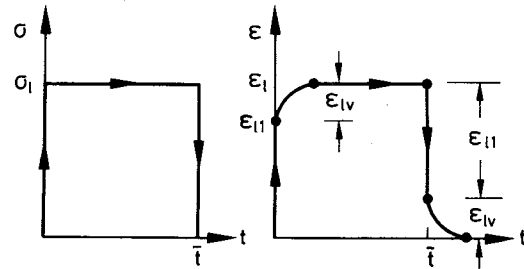


Bild 4.1.17 Verzögert-elastisches Verhalten

bezeichnet. Die Ursache ist auf reversible Umordnungen von Atomen, sogen. Platzwechsel, zurückzuführen.

Aus Bild 4.1.17 erkennt man, daß sich die gesamte Formänderungsenergie aus einem spontan-elastischen und einem verzögert-elastischen Anteil zusammensetzt:

$$\text{ges } w = w_{el} + w_v = \frac{\sigma_l \epsilon_{l1}}{2} + \sigma_l \epsilon_{lv} \quad (4.1.14)$$

Der verzögert-elastische Anteil ist irreversibel und stellt eine Verlustarbeit dar. Das verzögert-elastische Verformungsverhalten von Beton, Kunststoffen u.a. äußert sich zum einen in den Langzeitverformungen und zum anderen im Dämpfungsverhalten unter schwingender Beanspruchung. Unter Dämpfung versteht man die Verlustarbeit je Schwingungsspiel. Im Beispiel von Bild 4.1.17 beträgt sie für den einmaligen Beanspruchungszyklus:

$$D = \sigma_l \epsilon_{lv} \quad (4.1.15)$$

Die Dämpfung führt bei schwingender Beanspruchung zum Nachhinken der Dehnung hinter der Spannung. Die Dämpfung bewirkt auch das Abklingen der Schwingungen von Bauwerken, die von außen angeregt wurden (Wind, Erdbeben). Näheres s. in [1] und [3].

Bei den metallischen Baustoffen hängt der E-Modul bei einer bestimmten Temperatur im wesentlichen nur von der Kristallstruktur bzw. Bindungsenergie des Matrixstoffes (z. B. Fe) ab. Die regellose Orientierung der Kristallite führt

zu einem nichtorientierten E-Modul (Isotropie); der in der Regel geringe Anteil an Legierungselementen, Ausscheidungen u.a. übt nur einen untergeordneten Einfluß aus. Durch Fertigungseinflüsse kann eine Anisotropie eintreten (Ziehstruktur).

Bei Verbundbaustoffen (s. 3.5) hingegen stellt der E-Modul eine Mischgröße dar, die von mehreren Parametern abhängt. Diese sind für einen zweiphasigen Verbundbaustoff (Bild 4.1.18):

- bezogene Volumenanteile der Stoffpartner
- E-Moduln abhängig von Beanspruchungsrichtung
- Art der Verteilung, Orientierung, Ankoppelung der Stoffe
- Form und Größe der Stoffpartner u.a.

Wie der E-Modul durch diese Parameter beeinflusst wird, kann man näherungsweise durch die sog. Mischungsregel darstellen, mit der man auch Maßnahmen zur gezielten Beeinflussung von E beurteilen kann.

Bei einem Verbundbaustoff aus parallel zu einander geschalteten Partnern erhält man den resultierenden E-Modul näherungsweise zu:

$$E = v_M \cdot E_M + (1-v_M) E_P = E_M \left[ v_M + (1-v_M) \frac{E_P}{E_M} \right] \quad (4.1.16)$$

Beispiel: Unidirektional glasfaserverstärktes Polyesterharz GFK.

Sind jedoch die Partner in Reihe geschaltet, so ergibt sich:

$$E = E_M \frac{1}{v_M + (1-v_M) \frac{E_M}{E_P}} \quad (4.1.17)$$

Bild 4.1.19, obere Hälfte, zeigt, wie sich der E-Modul »verweicht«, wenn eine Matrix M durch Partikel P gemagert wird, die weniger steif als die Matrix sind; Beispiel: Leichtbeton. Wird hingegen eine Versteifung angestrebt, so muß  $E_P > E_M$  sein. Dann wird  $E/E_M > 1$ ; s. untere Bildhälfte. Beispiele: GFK und Normalbeton.

Bei realen Verbundbaustoffen, insbesondere bei regellos orientierten Fasern oder dispers verteilten Partikeln in einer Matrix, vermengen sich Parallel- und Reihenschaltung. Näheres s. in [15].

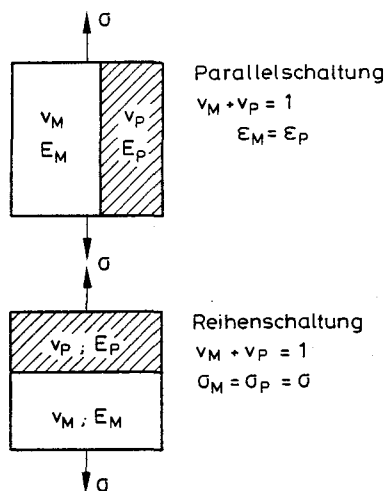


Bild 4.1.18 E-Modul von Verbundbaustoffen nach der Mischungsregel

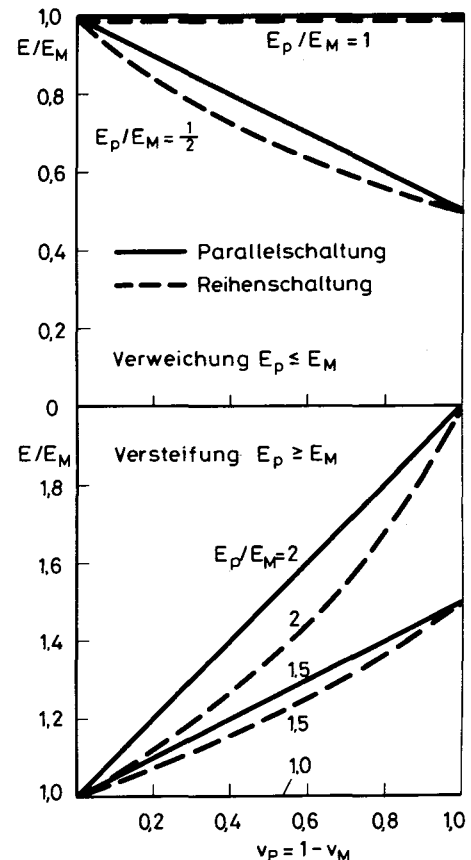


Bild 4.1.19 Beeinflussung des E-Moduls von Verbundbaustoffen

#### 4.1.5.2 Plastizität

Zahlreiche metallische Baustoffe verhalten sich nur bis zu einer Grenzspannung elastisch. Diese Grenzspannung wird bei naturharten Stählen mit Fließgrenze  $\sigma_F$  oder mit Streckgrenze  $\sigma_S$  bezeichnet. Auch die Bezeichnung Elastizitätsgrenze  $\sigma_E$  ist gebräuchlich (s. Bild 4.1.25). Mit Erreichen der Fließgrenze setzen, bei gleichsam gespeicherter elastischer Grenzdehnung  $\epsilon_F$ , plastische Dehnungen ein (Bild 4.1.20). Diese bleiben auch nach Entlastung bestehen; nur die elastische Grenzdehnung  $\epsilon_F$  wird wiedergewonnen. Man nennt ein derartiges Verhalten idealisiert elastisch-plastisch.

Das ideale elastisch-plastische Verhalten kann durch den St. Venantschen Gleitreibungskörper beschrieben werden, der erst dann ins Gleiten gelangt, wenn die Kraft in der Zugdeichsel (Feder) die Reibung überwindet. Die plastische Formänderungsenergie nimmt mit der plastischen Dehnung  $\epsilon_{pl}$  zu und ist eine Verlustarbeit. Dementsprechend ist das plastische Dämpfungsvermögen bei Anregung durch Schwingungen, bei denen die Grenzspannung in Querschnittsbereichen erreicht wird, groß.

Die Plastizität von Metallen besitzt mehrere Ursachen, die bereits in Abschnitt 3 angesprochen wurden. Die Kristallplastizität äußert sich als Abgleitung im Innern von Kristallblöcken entlang von bestimmten Gleitebenen. Verglichen damit benötigt die Abgleitung durch Versetzungsbewegung (Linienfehler im Kristallbau) einen weit geringeren Kraftaufwand. Die Bewegung von Versetzungen stellt demnach die dominierende Ursache plastischen Verhaltens dar. Die Bewegung der Versetzungen läuft nicht unbehindert ab. Die

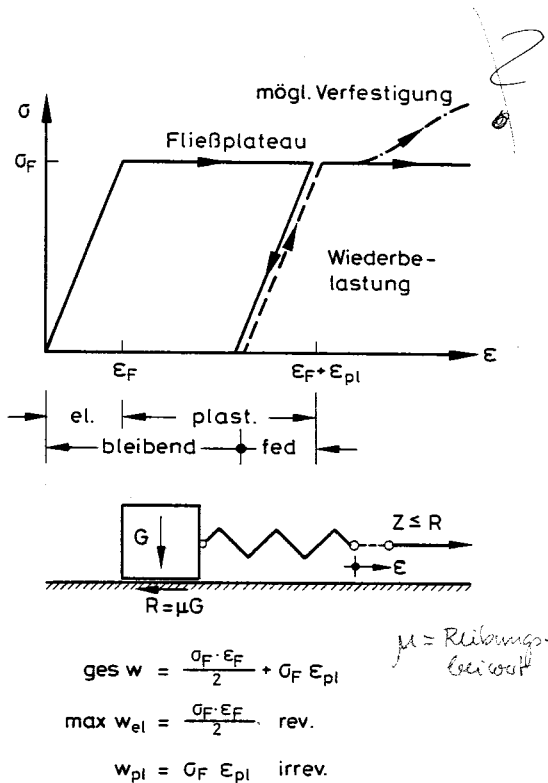


Bild 4.1.20 Elastisch-plastisches Verformungsverhalten

Versetzungen werden an Korngrenzen, Einschlüssen und anderen Teilchen aufgestaut. Dies führt zu einer Verfestigung und zum Aufsteigen der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie aus dem Fließplateau. Die Blockierung von Versetzungsbewegungen durch feines Korn (viele Grenzen), Ausscheidungen, Teilchen u.a.m. wird zur Festigkeitssteigerung von Baometallen gezielt genutzt.

Das plastische Verhalten von Baometallen besitzt eine Reihe von Vorteilen, wobei vorausgesetzt ist, daß im Gebrauchszustand keine plastischen, also bleibenden Verformungen auftreten dürfen. Die Plastizität erlaubt das warme und kalte Umformen von Stahl. Bauteile aus Werkstoffen mit einem plastischen Verformungsanteil zeigen eine Überbelastung durch bleibende Verformungen an (Vorwarnung, Sicherheit). Eigenspannungen und Spannungsspitzen werden durch plastische Verformungen abgebaut. Die plastische Verformbarkeit nimmt mit fallender Temperatur, bei rascher Belastung und bei Spannungsmehrrachsheit ab.

#### 4.1.5.3 Viskosität *elastisch*

Die Viskosität beschreibt das Verhalten einer Flüssigkeit, die unter dem Einfluß einer Scherspannung verformt wird. Während ein Feststoff, der elastisch oder elastisch-plastisch reagiert, eine im wesentlichen zeitunabhängige Verformung erfährt, kommt die beanspruchte Flüssigkeit nicht zur Ruhelage.

Das viskose Verhalten ist aus verschiedenen Gründen von Interesse. Eine Reihe von Baustoffen weist unter Gebrauchsspannungen Wesenszüge einer Flüssigkeit auf. Beispiele: Beton kriecht unter einer andauernden Druckspannung über Jahre, wobei allmählich eine Ruhelage erreicht wird. Zu dicke und zu weich eingestellte bituminöse Spachtelbeläge auf Wänden sacken ab, bilden Wellen und Falten. Zahlreiche Baustoffe werden in einem flüssigkeits-

ähnlichen Zustand geliefert, angemacht und verarbeitet. Beispiele: Die Konsistenz von Frischbeton, steif, plastisch oder weich, beschreibt dessen viskoses Verhalten und dessen Verarbeitbarkeit. Farben werden durch die Viskosität erst streichbar, denn diese verhindert das Abfließen im frischen Zustand und sorgt für das Verlaufen des Pinselstrichs.

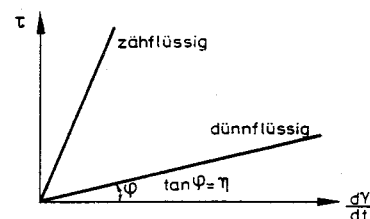
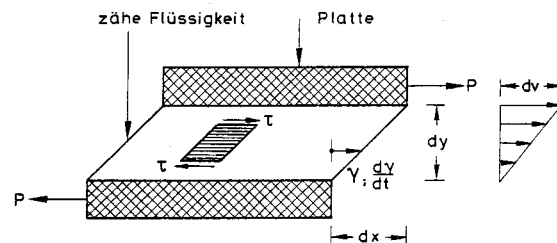
Zur Darstellung viskosen Fließens betrachten wir eine zwischen zwei planparallelen Platten eingeschlossene Flüssigkeitsschicht (Bild 4.1.21). Die Platten werden gegeneinander durch entgegengesetzt wirkende Kräfte  $P$  verschoben, so daß zwischen beiden Platten die Geschwindigkeitsdifferenz  $dv$  herrscht. Beziehen wir die Kraft, die gleichzeitig auch den Scherwiderstand darstellt, auf die Plattenfläche, so erhalten wir die Scherspannung

$$\tau = \frac{P}{F_s} \quad [\text{Dimension } 1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2] \quad (4.1.18)$$

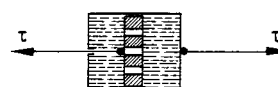
Entsprechend der elastischen Schubverformung tritt auch hier der Winkel der Gleitung auf. Bereits aus der Anschauung ist klar, daß der Scherwiderstand umso größer sein wird, je schneller der Gleitwinkel aufgezwungen wird. Damit erhalten wir das Verformungsgesetz einer linear-reinviskosen, sog. Newton'schen Flüssigkeit [N 2] zu

$$\tau = \eta \frac{dy}{dt} \quad (4.1.19)$$

wobei  $dy/dt$  die Winkeländerung je Zeiteinheit und  $\eta$  die dynamische Viskosität in  $\text{Pas} \triangleq \text{Ns/m}^2$  darstellt. Die Viskosität ist das Maß für die innere Reibung einer Flüssigkeit: je größer  $\eta$ , umso zähflüssiger ist sie. Die Temperatur hat einen großen Einfluß: je höher die Temperatur, umso geringer wird  $\eta$ . Der Newton-Dämpfer stellt ein mechanisches Modell des viskosen Fließens dar.



Newton'sche Flüssigkeit



Newton'scher Dämpfer

Bild 4.1.21 Verformungsverhalten einer viskosen Flüssigkeit



#### 4.1.5.4 Viskoelastizität

Einige Baustoffe, wie z.B. Beton, zeigen unter längerer Lasteinwirkung ein zeitabhängiges, irreversibles Verformungsverhalten, auch unter geringen Spannungen. Dies bedeutet, daß im Verformungsverhalten neben der elastischen Komponente auch die einer viskosen Flüssigkeit enthalten sein muß. Ein derartiges Verhalten wird als viskoelastisch bezeichnet.

Die Viskoelastizität äußert sich in den Phänomenen Kriechen und Relaxation. Unter Kriechen wird die zeit- und temperaturabhängige Verformung unter konstanter Spannung verstanden. Relaxation ist die zeit- und temperaturabhängige Selbstentspannung bei konstanter Verformung (= Ausgangsverformung).

Bild 4.1.22, obere Hälfte, zeigt das Ergebnis eines Kriechversuchs. Beim Aufbringen der Spannung  $\sigma$  stellt sich die spontan-elastische Dehnung  $\epsilon_{el}$  ein, zu der im Laufe der Zeit die Kriechdehnung  $\epsilon_k$  hinzutritt. Man unterscheidet drei Bereiche des Kriechens bzw. der Kriechgeschwindigkeit: Im primären Bereich nimmt die Kriechgeschwindigkeit stetig ab, im sekundären ist sie konstant, und im tertiären Bereich nimmt sie lawinenartig zu, bis ein Kriechbruch eintritt. Die Bruchzeitpunkte  $t_u$  liegen auf der Kriechbruchlinie. Die Lebensdauer  $t_u$  nimmt mit Abnahme der Kriechspannung zu. Man bezeichnet jene Grenzspannung, die gerade noch unendlich lange ohne Bruch ertragen werden kann, als Dauerstandfestigkeit (s. Abschn. 5.7).

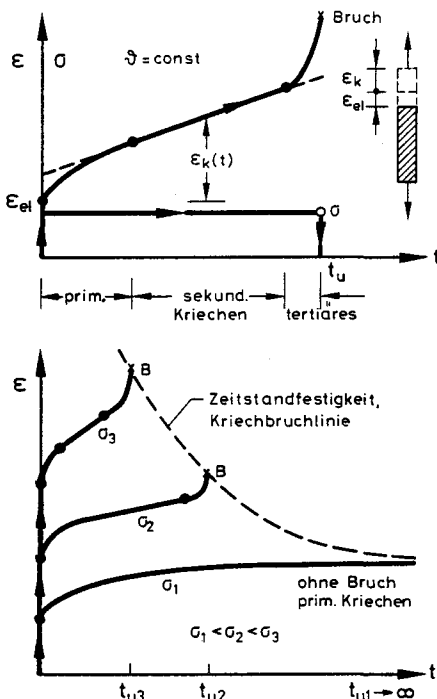


Bild 4.1.22 Kriechen und Kriechbruch

Hohe Temperaturen verkürzen die Lebensdauer. Aus diesem Grund darf, bei vorgegebener Betriebstemperatur, die Dauerspannung nur so hoch gewählt werden, daß während der Betriebszeit ein Kriechbruch nicht eintritt: es darf nur primäres Kriechen ablaufen.

Das Kriechen von Metallen ist auf Versetzungsbewegungen und Gleitvorgänge zurückzuführen. Bei Kunststoffen treten Streckungen und Abgleitungen von Ketten auf. In den hochporösen Stoffen wie Zementstein ist das Kriechen mit der Wechselwirkung zwischen Feststoff und Wasserfilmen verbunden (s. Abschn. 5.6).

Das Stahlkriechen ist im Stahl- und Stahlbetonbau wegen des großen Abstands der zulässigen Spannung von der Elastizitätsgrenze, ab der erst eine Versetzungsbewegung einsetzt, unbedeutend. Dies gilt nicht mehr für sehr hoch vorgespannte Spannstähle des Spannbetonbaus. Allerdings tritt hier an die Stelle des Kriechens die Relaxation (Bild 4.1.23): Der gespannte Stahl ist gegen das starre Bauteil verankert und behält deshalb seine Anfangsdehnung  $\epsilon_{el} = \sigma_0/E$  bei. Innere Gleitvorgänge bewirken das zeitabhängige Nachlassen oder Selbstentspannen des Stahls. Der Spannungsverlust ist umso größer, je näher die Anfangsspannung  $\sigma_0$  an der Elastizitätsgrenze  $\sigma_E$  des Stahls lag und je höher die Dauertemperatur ist.

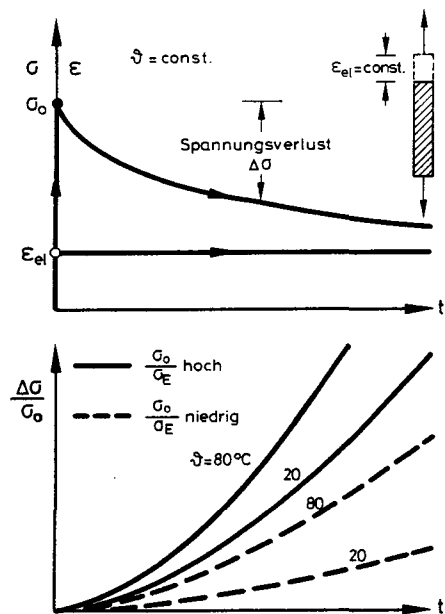


Bild 4.1.23 Relaxation, Ablauf und Einflüsse

Für Beton und Kunststoffe stellen Kriechen und Relaxation wesentliche Erscheinungen dar, die bei der Bauteilausbildung berücksichtigt werden müssen. Näheres s. bei diesen Stoffen in Abschn. 5.

Viskoelastisches Verhalten läßt sich durch eine Kombination von Feder und Dämpfer veranschaulichen (s. Bild 4.1.24). Der Maxwell-Körper, eine Reihenschaltung, zeigt die spontane Elastizität und die zeitabhängige viskose Dehnung, jedoch keine verzögerte Elastizität. Der Kelvin-Körper, eine Parallelschaltung, ist nur verzögert-elastisch. Die Rheologie versucht, das Verhalten von Baustoffen durch solche Körper zu modellieren [3, 12].

Eng verwandt mit dem Kriechen ist die Relaxation. Wir verstehen darunter den zeitabhängigen Abbau von Spannungen in einem Körper, dem eine Verformung aufgezwungen wurde (s. Abschnitt Beton).

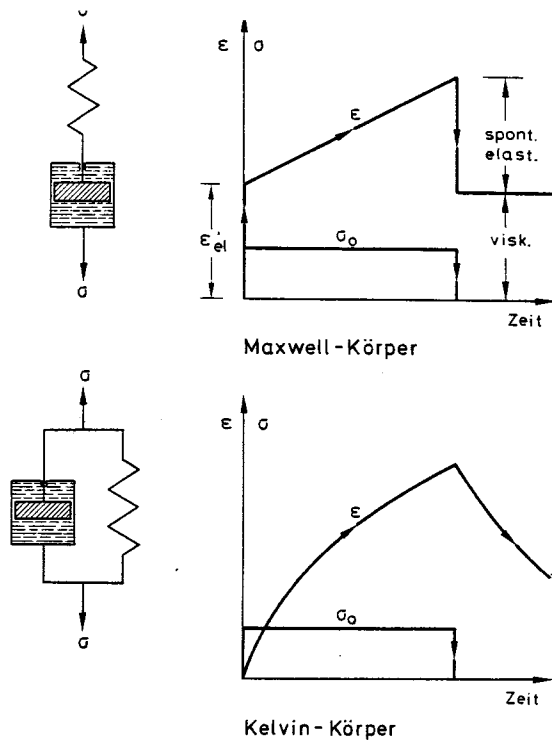


Bild 4.1.24 Viskoelastische Modellkörper

## 4.1.6 Werkstoffverhalten unter statischer Beanspruchung

### 4.1.6.1 Baupraktische Bedeutung

Ein Bauteil muß so bemessen werden, daß es unter den Spannungen des Gebrauchszustands weder seine Funktionsfähigkeit verliert noch versagt. Das Versagen eines Bauteils kann entstehen durch:

- große bleibende Verformungen,
- lokalen oder vollständigen Bruch,
- Instabilwerden (z. B. Ausknicken) oder durch
- Korrosion und Verschleiß.

Eine Kombination dieser Versagensursachen ist häufig (Komplexwirkung).

### 4.1.6.2 Kraft-Verformungsverhalten unter zügiger Beanspruchung

Das Kraft-Verformungsverhalten von Werkstoffen bei Kurzzeitbeanspruchung wird im einachsigen Zug- oder Druckversuch an Probestäben runden oder rechteckigen Querschnitts bestimmt. Die Beanspruchung wird dabei zügig bis zum Versagen gesteigert; es liegen also statische Bedingungen vor (s. Abschnitt 4.1.3). Das Versagen tritt ein, wenn bei stark zunehmenden Verformungen eine weitere Kraftsteigerung unmöglich wird oder wenn ein Bruch durch Trennung oder Zerfall des Stoffes erfolgt. Die zum Versagen führende Spannung wird als Festigkeit bezeichnet.

Das Versuchsergebnis wird als Spannungs-Dehnungs-Linie (SDL) dargestellt, die eine Reihe von Informationen über das Werkstoffverhalten enthält und eine für jeden Stoff charakteristische Form aufweist. Bild 4.1.25 zeigt als Beispiel die SDL eines zähen, metallischen Werkstoffs bei Zug-

beanspruchung: Die SDL beginnt mit einem linearen Ast, der den ideal-elastischen Bereich darstellt. In diesem Bereich treten nur elastische und keine bleibenden Dehnungen auf. Der Elastizitätsmodul ist die Steigung des Anfangsastes:

$$E = \tan \varphi = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad (4.1.20)$$

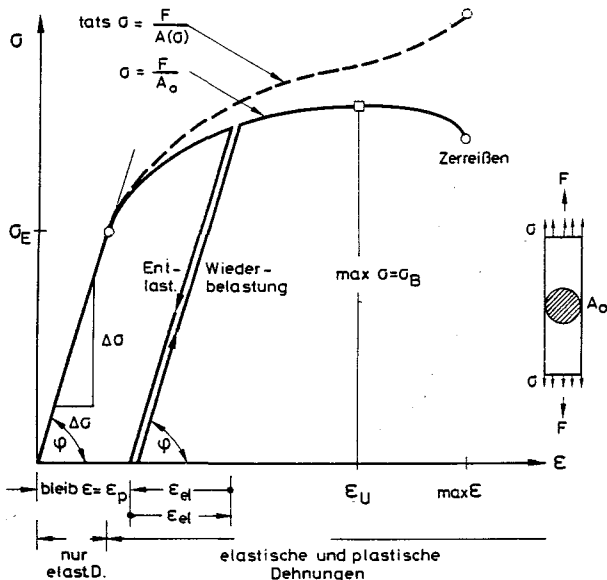


Bild 4.1.25 Spannungs-Dehnungslinien eines metallischen Stoffs (schematisch)

Bei Messung der Querdehnung  $\varepsilon_q$  erhalten wir außerdem die Querkontraktionszahl  $\mu$  und den Schubmodul  $G$ . Der elastische Bereich endet an der Elastizitätsgrenze  $\sigma_E$ , ab der neben elastischen auch bleibende, also plastische Verformungen auftreten. Der Anteil der plastischen Verformung wird durch eine Zwischenentlastung sichtbar; er steigt mit zunehmender Spannung an. Ab  $\sigma_E$  ändert sich der Kurvenverlauf, die Verfestigung setzt ein: Der Spannungsanstieg wird immer kleiner, bis der Größtwert  $\max \sigma$ , die Festigkeit, erreicht ist. Der hier dargestellte Werkstoff besitzt keine ausgeprägte Fließ- oder Streckgrenze. Andere weisen ein Fließplateau vor der Verfestigung auf (s. Bild 4.1.26). Die Werkstofftrennung setzt nun bei fallender Kraft ein (s. Abschn. 5.1).

Wegen der Querschnittsverjüngung stellt die Spannung  $\sigma$  eine Nennspannung dar, da sie mit dem Ausgangsquerschnitt  $A_0$  bestimmt wurde. Da aber die Querschnittsfläche abnimmt, ist die tatsächliche Spannung größer, s. gestrichelte Linie. Sie kann jedoch für den Entwurf von Konstruktionen nicht benutzt werden, da der Zusammenhang zwischen Querschnitt und Spannung nicht vorhersagbar ist. Die plastische Verformungsfähigkeit des Stoffs wird durch die bleibenden Dehnungen unter der Größtspannung  $\max \sigma$  bzw. beim Bruch beschrieben. Ein Werkstoff ist umso zäher bzw. duktiler, je größer die plastischen Verformungen beim Bruch sind. Spröde Stoffe besitzen geringe Bruchdehnungen. Vom Standpunkt der Sicherheit von Konstruktionen sind zähe Werkstoffe gegenüber spröden zu bevorzugen. Die Fläche unterhalb der SDL ist die erforderliche Brucharbeit, die ein Maß für die Zähigkeit darstellt.

Die SDL wird im Kurzzeitversuch gewonnen. Die Festigkeits- und Verformungskennwerte sind von den Versuchsbedingungen mit abhängig. Vor allem bei Stoffen mit ausgeprägtem zeitabhängigen Verhalten beeinflusst die Spannungs- oder Dehngeschwindigkeit das Ergebnis ebenso wie die Temperatur. Der Vergleich zwischen Baustoffen ist erst bei Kenntnis der Versuchsbedingungen möglich (s. Materialprüfnormen für die jeweiligen Baustoffe).

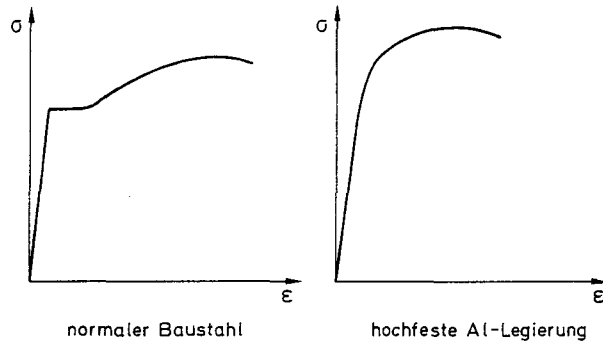


Bild 4.1.26 Zugspannungs-Dehnungslinien einiger metallischer Werkstoffe

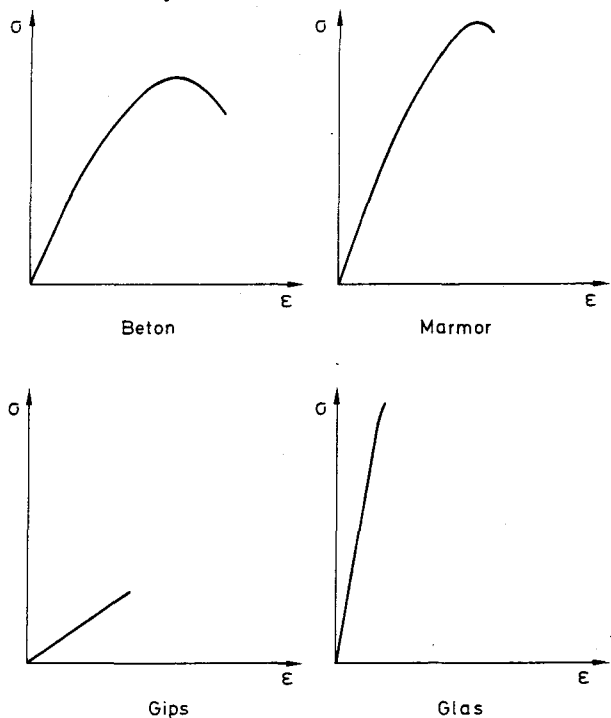


Bild 4.1.27 Druckspannungs-Dehnungslinien einiger keramischer Werkstoffe

Die Bilder 4.1.26 bis 4.1.28 zeigen Beispiele von Spannungs-Dehnungs-Linien einiger Baustoffe. Die SDL sind unmaßstäblich, aber untereinander vergleichbar. Die Stoffe weisen bezüglich der Form der SDL, der Zähigkeit und anderes mehr große Unterschiede auf.

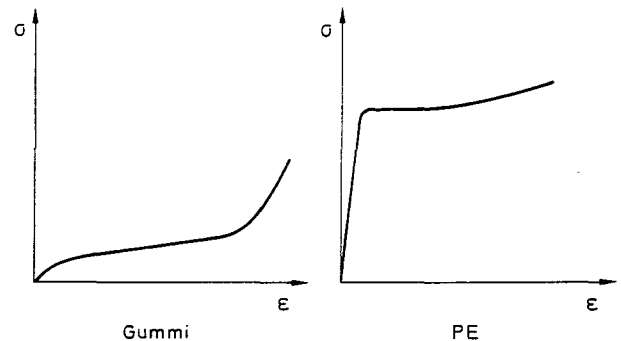


Bild 4.1.28 Zugspannungs-Dehnungslinien einiger Polymere

#### 4.1.6.3 Bruch

Die Art des Versagens eines Stoffs beeinflusst dessen Einsetzbarkeit und die Sicherheit von Bauteilen. Beim Bruch werden Atombindungen zerstört und Riß- sowie Bruchflächen im Innern des Stoffs erzeugt. Dabei können folgende Arten des Bruchs eintreten: zäher oder spröder Bruch.

Beim zähen oder duktilen Bruch wird der Gleitwiderstand entlang bestimmter Gleitebenen (s. Bild 3.15) überwunden; das Versagen kündigt sich mit großen bleibenden Dehnungen an. Demgegenüber wird beim spröden Bruch der Trennwiderstand von Atombindungen überwunden, wobei das Versagen mit nur geringen oder gar keinen bleibenden Verformungen verknüpft ist.

Der Sprödbbruch besteht aus zwei aufeinander folgenden Phasen: Rißeinleitung und Rißausbreitung. An einem bereits vorhandenen Anriß findet zunächst eine langsame Rißaufweitung mit ebenso langsamer Rißausbreitung statt. Der Anriß kann durch eine Werkstoffinhomogenität, durch den Fertigungsprozeß (Härteriß, Schweißnahtriß u.a.), durch Oberflächenverletzung oder durch mechanische Beanspruchung entstanden sein. Ab einer kritischen Riß-tiefe schlägt die langsame Rißausbreitung in eine spontane um. Der Riß breitet sich plötzlich und mit hoher Geschwindigkeit aus.

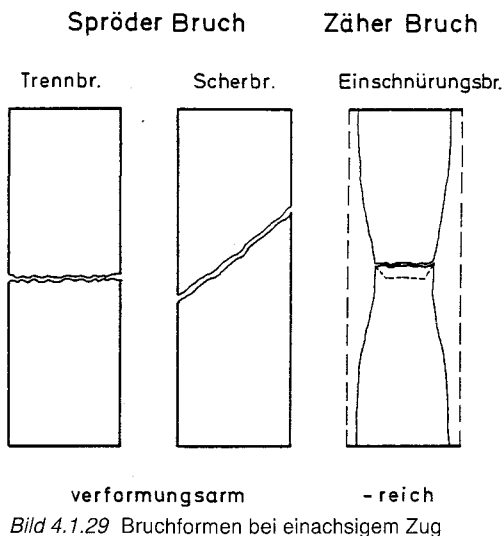
Der Sprödbbruch tritt ohne plastische Vorwarnung auf. Er muß deshalb aus Sicherheitsgründen vermieden werden. Mit der Abschätzung der Sprödbbruchgefahr in Konstruktionen befaßt sich die Bruchmechanik [11].

Die Sprödbbruchgefahr wird durch

- tiefe Temperaturen,
- Inhomogenitäten im Werkstoff,
- Unstetigkeiten (mehrachsiges Spannungen) im Querschnitt wie Kerben, Risse u.a.,
- geringe Duktilität des Stoffs und durch
- hohe Beanspruchungsgeschwindigkeit begünstigt.

Metallische Stoffe weisen bei Zugbeanspruchung die in Bild 4.1.29 gezeigten Bruchformen auf. Der Trenn- und Scherbruch gehören zur spröden Bruchart, die bei hochfesten, verformungsarmen Stählen vorkommt. Sprödbbruch tritt

auch bei Stoffen mit inneren Inhomogenitäten (innere Kerben, Verunreinigungen, Ausscheidungen u. a.) auf, wie z. B. bei Grauguß mit lamellarem Graphit. Der Einschnürungsbruch ist ein zäher Bruch und mit großen plastischen Verformungen verbunden. Die SDL von Bild 4.1.25 zeigt durch das steile Ansteigen der tatsächlichen Spannung das Entstehen einer Einschnürung an. Der Einschnürungsbruch ist typisch für kohlenstoffarme, unlegierte Baustähle. Bei Druckbeanspruchung fließen zähe Stähle, ohne zu versagen.



Keramische Werkstoffe wie Glas, Beton oder Ziegel versagen bei Zugbeanspruchung spröde durch Scher- oder Trennbruch. Auf Druck hingegen weisen Stoffe wie Beton eine gewisse Verformungsfähigkeit auf; sie versagen durch Zersprengen (s. Bild 4.1.30). Holz auf Druck wird durch Stauchen der Röhrenstruktur zerstört; die Last-Faserichtung bestimmt die Versagensart. Die Anisotropie eines Baustoffs beeinflusst die Versagensart (Bild 4.1.32).

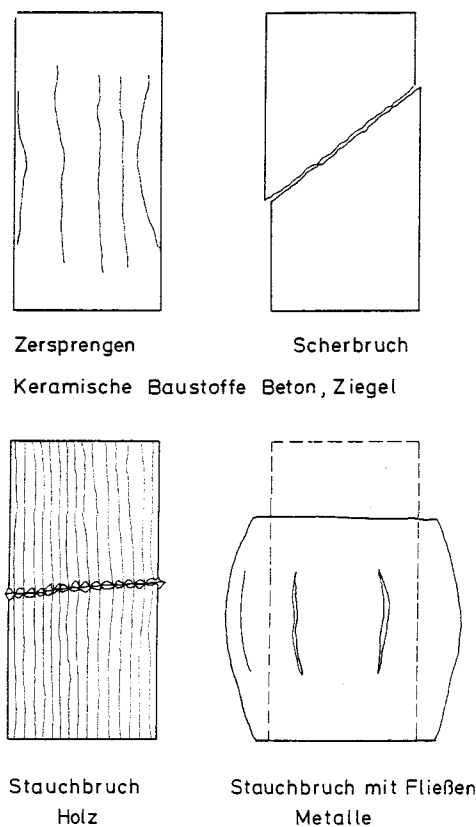
#### 4.1.6.4 Festigkeit der Baustoffe

##### Theoretische und technische Festigkeit

Die Festigkeit eines Baustoffs ist der größte Widerstand, den dieser einer äußeren Beanspruchung entgegensetzen kann. Bedingt durch die chemisch-physikalische Natur und durch die technische Herstellung gibt es weder idealkristalline noch ideal-amorphe Baustoffe. Sie sind stets mit Anisotropien, Inhomogenitäten, größeren Fehlern usw. behaftet. Aus den Bindekräften des Atombaus ist es möglich, die theoretische Zugfestigkeit eines ideal fehlerfreien, kristallinen Stoffes zu schätzen:

$$\text{theor. } \sigma_B \approx \frac{E}{5 \text{ bis } 10} \quad (4.1.21)$$

Der Vergleich mit Versuchen zeigt jedoch, daß die tatsächlichen Werte nur 1/100 bis 1/10 der theoretischen Zugfestigkeit betragen. Die Ursache für diese Diskrepanz sind mikro- und makroskopische Fehler im Stoffgefüge. Der Bruch beginnt mit Mikrorissen als Bruchkeime an Stellen von inneren Spannungskonzentrationen. Die hohen Spannungsspit-



zen an den Rißwurzeln (sehr große Kerbschärfe) führen zum progressiven Zerreißen der Probe. Bei Ansatz innerer Risse kann man mit der Bruchmechanik die weitaus geringeren technischen Festigkeiten erklären, die durch die Materialprüfung an Stoffproben erzielt werden. In Anbetracht der Inhomogenitäten, Baufehler etc. in Stoffen hängt die technische Festigkeit auch von der Art der Beanspruchung ab: ein- oder mehrachsiger Spannungszustand, Zug oder Druck, Spannungs-Zeitgeschichte, Beziehung zwischen Stoffanisotropie und Beanspruchungen u. a. m.

##### Arten der Festigkeit

Die technische Festigkeit wird an Baustoffproben in der Regel unter einachsigen Spannungen, Zug oder Druck, geprüft: einachsige Festigkeit. Sie stellt den Größtwert der Spannungen in der SDL dar und ist wie folgt definiert (Bild 4.1.25):

$$\sigma_B = \max \sigma = \frac{\max F}{A_0}, \quad (4.1.22)$$

wobei max F die Höchstkraft und  $A_0$  den Ausgangsquerschnitt darstellen. Wir sprechen dann von der Zug- oder Druckfestigkeit (Bild 4.1.31). Erfährt der Querschnitt durch plastische oder bleibende Verformungen eine nennenswerte Veränderung, wie dies im Einschnürbereich eines zähen Stahls der Fall ist (Bild 4.1.25), so unterscheidet sich die wahre Bruchspannung (Reißfestigkeit) im Bruchquerschnitt  $A_B$

$$\text{eff } \sigma_B = \frac{\max F}{A_B} > \sigma_B \quad (4.1.23)$$

deutlich von der technischen Festigkeit. Dieser Unterschied ist aber nur von theoretischer Bedeutung: Bei einem längeren Konstruktionsbauteil würde an allen anderen Stellen die Größtspannung  $\sigma_B$  herrschen. Aber es ist wichtig zu erkennen, daß die Größtspannung  $\sigma_B$  eine Nenn- und nicht die wahre Festigkeit darstellt. Bei allen Baustoffen, die verformungsarm versagen, ist der Unterschied zwischen  $\sigma_B$  und  $\sigma_{eff}$  ohnehin unerheblich.

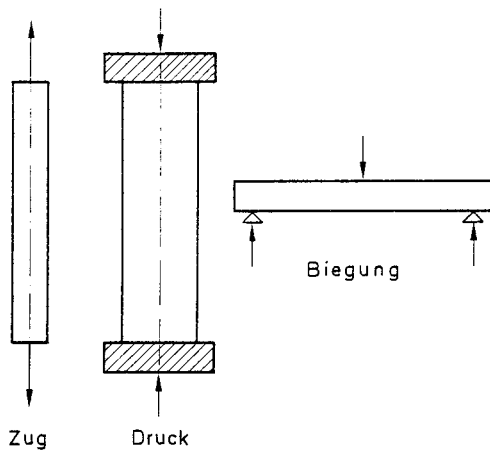


Bild 4.1.31 Einige Festigkeitsarten

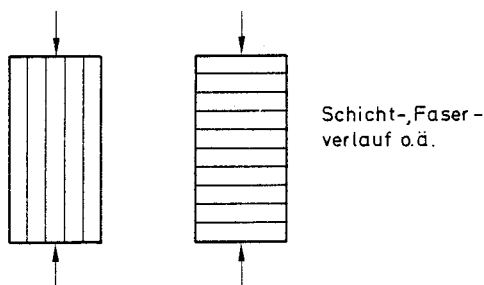


Bild 4.1.32 Zusammenhang zwischen Festigkeit und Stoffanisotropie

Bei Baustoffen, die überwiegend auf Biegung beansprucht werden, wird die Biegefestigkeit bestimmt (Beispiel: Schichtwerkstoffe wie Sperrholzplatten).

Die technischen Festigkeiten stellen nicht immer wahre Festigkeiten dar. Die Anordnung und Durchführung des Versuchs kann einen Einfluß auf die aufnehmbare Kraft  $\max F$  ausüben: bei kurzen Probestäben kann die freie Verformbarkeit durch die Krafteinrichtungsvorrichtung behindert werden (z. B. Reibung zwischen Druckplatte und Betonwürfel beim Druckversuch). Festigkeitswerte gewinnen erst Sinn und werden vergleichbar, wenn man die Versuchsbedingungen kennt. Auch bei strenger Einhaltung der Versuchsregeln stellen die Festigkeitswerte streuende Größen dar. Die Statistik ist deshalb ein unerlässliches Werkzeug der Forschung, Qualitätskontrolle und der Bauteilsicherheit geworden.

Die Festigkeit wird vom zeitlichen Ablauf und der Dauer ihrer Belastung beeinflusst. Bei zügiger Beanspruchung (Regelfall der Festigkeitswerte in Normen) erhält man die sog. Kurzzeitfestigkeit, die mit zunehmender Spannungs- oder Dehngeschwindigkeit ansteigt. Zur Simulation langandauernder Belastung in der Praxis führt man auch Standversuche durch. Als Zeitstandfestigkeit wird ein Wertepaar aus

Bruchspannung und Bruchstandzeit definiert. Die Dauerstandfestigkeit ist jene Spannung, die unendlich lang und gerade bruchfrei vom Baustoff getragen werden kann. Es gilt:

Kurzzeitfestigkeit > Zeitstandfestigkeit > Dauerstandfestigkeit.

Die Versuchstemperatur ist ebenfalls eine wichtige Einflußgröße: in der Regel nimmt mit steigender Temperatur die Festigkeit ab und umgekehrt. Bei zahlreichen Baustoffen wird die Festigkeit von der Stoffeuchte beeinflusst.

Da der Baustoff im Tragwerk nicht nur einachsigt, sondern in der Regel mehrachsigt beansprucht wird, interessiert die Festigkeit unter mehrachsigen Spannungen. Es ist offensichtlich, daß deren Bestimmung mit großen experimentellen Schwierigkeiten verknüpft sein muß (Problem der Krafteinleitung). Die mehrachsige Festigkeit wird deshalb in der Regel über die Kurzzeitfestigkeit mit Hilfe von sog. Festigkeitshypothesen vorhergesagt [3, 14].

Tab. 4.1.2 enthält eine Übersicht über die Festigkeiten gebräuchlicher Baustoffe. Die DIN-Taschenbücher der Materialprüfnormen der verschiedenen Baustoffe enthalten die Prüf- und Meßmethoden, s. 4.1.8. Die Methoden zur Festigkeitssteigerung (Verfestigung) werden in [13] und [15] behandelt. Auf einige wird im Abschn. 5 eingegangen.

Tab. 4.1.2 Festigkeiten einiger Baustoffe

Werkstoff	Druckfestigkeit	Zugfestigkeit
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
Stahl	200 bis 2000	
Beton	5– 100	0,5– 8
Ziegel	5– 50	0,5– 5
min. Mörtel	5– 50	0,5– 5
Gips	5– 40	0,1– 4
Glas	1000–2000	100 –2000
Holz    zur Faser	5– 15	5 – 30
PMMA-Kunststoff	20– 120	20 – 120

## 4.1.7 Werkstoffverhalten unter schwingender Beanspruchung

### 4.1.7.1 Baupraktische Bedeutung

Zahlreiche Bauteile (z. B. Eisenbahnbrücken) werden vorwiegend nichtruhend beansprucht. Wegen der häufigen Wiederholung wird von einer schwingenden Beanspruchung gesprochen, deren zeitlicher Verlauf gemäß Bild 4.1.4 idealisiert werden kann. Aufmerksam gemacht durch Schäden, ja sogar durch Einstürze von Brücken, erkannte man, daß ein Stoff eine Spannung, die selbst bei weitem nicht zum Bruch führt, nicht beliebig oft ertragen kann, sofern bestimmte Bedingungen überschritten werden. Die Spannungswiederholung kann zur Materialermüdung und

letztlich zum Dauerbruch führen. Der Dauerbruch ist ein spröder Bruch ohne plastische Vorwarnung. Er muß deshalb unbedingt unterbunden werden.

Die Ermüdung hängt von zahlreichen Einflußgrößen ab. Von der Beanspruchungsseite ist die Spannungs-Zeitfunktion von Einfluß, s. Bild 4.1.4. Sie wird durch folgende Größen beschrieben:

- Oberspannung  $\sigma_o$ , Mittelspannung  $\sigma_m$  und Unterspannung  $\sigma_u$ ,
- Spannungsamplitude  $\sigma_a = (\sigma_o - \sigma_u)/2$ ,
- Funktionsform sowie
- Frequenz bzw. Periodendauer eines Lastspiels.

Bild 4.1.4 zeigt eine Schwellbeanspruchung, bei der die Spannungen  $\sigma_o$  und  $\sigma_u$  das gleiche Vorzeichen, dort (+) Zug, besitzen. Neben der Schwellbeanspruchung spricht man von Wechselbeanspruchung, wenn sich  $\sigma_o$  und  $\sigma_u$  voneinander im Vorzeichen unterscheiden. Zur Beschreibung der Beanspruchungsart dient das Spannungsverhältnis:

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} \quad (4.1.24)$$

Es ist  $R = +1$  bei ruhender Belastung, bzw. es ist  $R = -1$  bei reiner Wechselbeanspruchung. Weiter gilt:

- $+1 \geq R \geq 0$  für Schwellbeanspruchung bzw.
- $-1 \leq R \leq 0$  für Wechselbeanspruchung.

Bei der Dauerschwingprüfung einer Baustoffprobe (einachsig oder durch Biegung oder Torsion beansprucht) wird bei fester Mittelspannung sowie bei fest eingestellter Spannungsamplitude  $\sigma_a$ , die Spannungs-Zeitgeschichte  $\triangleq 1$  Lastwechsel so oft durchfahren, bis ein Dauerbruch eintritt. Man stellt fest, daß das Bruchlastspiel  $N_U$  mit abnehmender Amplitude  $\sigma_a$  zunimmt. Die Gesamtheit der Ergebnisse wird bei diesem Versuch, Einstufenversuch genannt, im sog. Wöhlerschaubild aufgetragen, s. Bild 4.1.33.

Die meisten Metalle zeigen einen stetigen Abfall der ertragbaren Spannungsamplitude bis zu einer Grenzlastspielzahl  $N_G = 10^6$  bis  $10^7$  und laufen dann etwa horizontal aus. Mit der zugehörigen Spannungsamplitude  $\sigma_A$  erhält man die Dauerfestigkeit (oder -schwingfestigkeit) zu [N 3]:

$$\sigma_D = \sigma_m \pm \sigma_A$$

Alle größeren Amplituden führen zu Brüchen im Bereich der Zeitfestigkeit. Die Dauerfestigkeit steigt mit Abnahme von  $\sigma_m$  an und umgekehrt. Entsprechend nimmt die ertragbare Amplitude von  $\sigma_A$  von  $R \geq -1$  (Wechselbeanspruchung) bis  $R \leq 1$  (Schwellbeanspruchung) stetig ab. Diese Zusammenhänge werden in sog. Dauerfestigkeitsschaubildern dargestellt, die bei den Baustoffarten im Abschn. 5 besprochen werden.

#### 4.1.7.2 Dauerbruch

Der Dauerbruch hängt mit Versetzungsbewegungen bzw. mit Abgleitungen entlang aktiver Gleitebenen zusammen. Die Abgleitungen treten an der Probenoberfläche als Stufen aus (Bild 4.1.34), die von den Gleitbändern gebildet werden. Diese Stufen werden als Extrusionen und Intrusionen bezeichnet und stellen Versetzungsanhäufungen dar, die mit Verfestigung und Abnahme von Zähigkeit verbunden

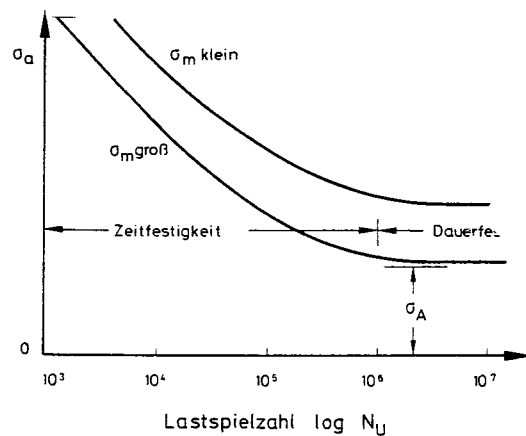


Bild 4.1.33 Dauerfestigkeit im Einstufenversuch (Wöhlerlinie)

sind. Die Gleitstufen sind Rißkeime, von denen die Daueranrisse ausgehen.

Die Beobachtung zeigt, daß der Dauerbruch in der Regel von der Werkstoffoberfläche ausgeht. Dabei sind Stellen mit hoher Kerbwirkung (Spannungsmehrfachigkeit mit starker räumlicher Behinderung von plastischen Verformungen) kritisch, weil dort die Anrißbildung einsetzt. Kerbwirkungen entstehen u. a. durch folgende Ursachen: konstruktive Kerben infolge von Querschnittssprüngen (Spannungsumlenkung und -anhäufung); Risse an Schweißnähten und infolge Härtung (Eigenspannungen); Korrosionsnarben und sonstige mikro- und makroskopische Fehler im Gefüge.

Bild 4.1.35 zeigt für einen Stahlstab die Entstehung des Dauerbruchs: Die Rißbildung beginnt an einer Oberflächenkerbe und schreitet nach innen lastspielabhängig fort. Dabei kann es zeitweilig zum Stillstand der Rißbildung kommen (Rastlinien). Kann der Restquerschnitt die Kraft  $F_o = \sigma_o \cdot A_o = (\sigma_m + \sigma_a) \cdot A_o$  nicht mehr tragen (Riß stellt eine sehr scharfe Kerbe dar), so kommt es zum spröden Bruch.

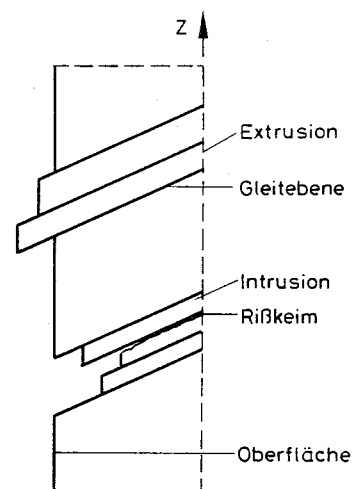


Bild 4.1.34 Bildung von Gleitbändern bei schwingender Beanspruchung

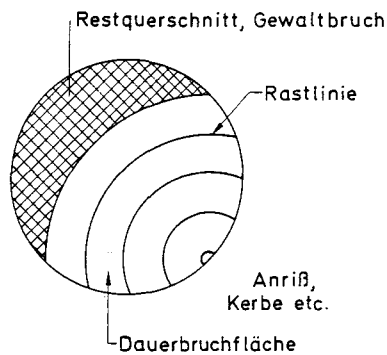


Bild 4.1.35 Form eines Dauerbruchs in einem Stahlstab

#### 4.1.7.3 Einflüsse auf die Dauerfestigkeit

Zusätzlich zu den Einflüssen aus der Beanspruchung, s. Abschnitt 4.1.7.1, wird die Dauerfestigkeit von Metallen von folgenden Parametern beeinflusst:

- Spannungsverteilung über den Querschnitt bei biegebeanspruchten Teilen. Flache Spannungsgradienten sind ungünstig.
- Kerbwirkungen sind umso nachteiliger, je schärfer der Kerb und je geringer die Zähigkeit des Werkstoffs ist.
- je rauher die Oberfläche ist, umso niedriger ist die Dauerfestigkeit (Kerbwirkung).
- Die Dauerfestigkeit wird durch korrosive Medien verringert.
- Die Dauerfestigkeit nimmt mit steigender Temperatur ab. Die Dauerfestigkeit anderer Baustoffe ist vergleichsweise wenig erforscht. Die beanspruchungsabhängigen Einflüsse entsprechen jedoch denen von Metallen.

#### 4.1.8 Normen, Richtlinien

- [N 1] DIN 1080: Begriffe, Formelzeichen und Einheiten im Bauingenieurwesen. 9 Teile, ersch. zw. 06.76 und 02.81.
- [N 2] DIN 1342: Viskosität Newton'scher Flüssigkeiten. 08.71.
- [N 3] DIN 50100: Werkstoffprüfung; Dauerschwingversuch, Begriffe, Zeichen, Durchführung, Auswertung. 02.78.

Baustoff- und Materialprüfnormen – DIN-Taschenbücher, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Köln und Bauverlag GmbH, Wiesbaden, Berlin.

- Bd. 17 Materialprüfnormen für Textilien. 1973.
- Bd. 18 Kunststoffe 1. Prüfnormen über mechanische, thermische und elektrische Eigenschaften. 7. Aufl., 1980.
- Bd. 19 Materialprüfnormen für metallische Werkstoffe 1: Probenahme, Abnahme, Prüfgeräte, Prüfmaschi-

nen, Mechanisch-technologische Prüfverfahren. 9. Aufl., 1981.

- Bd. 31 Normen für Holz. 4. Aufl., 1982.
- Bd. 33 Baunormen 2. Baustoffe 1. 4. Aufl., 1981.
- Bd. 37 Baunormen 6. Beton- und Stahlbetonbau. 5. Aufl., 1980.
- Bd. 60 Normen für Holzfaserplatten, Spanplatten, Sperrholz. 3. Aufl., 1982.
- Bd. 68 Baunormen 9. Mauerwerksbau. 2. Aufl., 1980.
- Bd. 69 Baunormen 10. Normen über Stahlbau 1, Hochbau. 3. Aufl., 1981.
- Bd. 144 Bauwesen 11. Normen über Stahlbau 2. Ingenieurbau. 2. Aufl., 1981.

#### 4.1.9 Literatur

- Horribogen, E.: Werkstoffe, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2. Auflage, 1979.
- Hayden, H. W., Moffatt, W. G., Wulff, J.: The Structure and Properties of Materials. Bd. III, Mech. Behaviour. J. Wiley & Sons, New York, 1965.
- Reinhardt, H.-W.: Ingenieurbaustoffe. W. Ernst & Sohn, Berlin, 1973.
- Stüwe, H.-P.: Einführung in die Werkstoffkunde. BI-Hochschultaschenbücher, Bd. 467, B.I.-Wissenschaftsverlag Mannheim/Wien/Zürich, 1978.
- Macherauch, E.: Praktikum in Werkstoffkunde. UNI-Text. 3. Auflage, Vieweg Verlag Wiesbaden, 1981.
- Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile. Bd. 1. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1973.
- Domke, W.: Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung. 9. verb. Auflage, Verlag W. Girardet, Essen, 1982.
- Bargel, H.-J. und Schulze, G.: Werkstoffkunde. H. Schroedel-Verlag KG, Hannover, 1978.
- Troost, A.: Einführung in die allgemeine Werkstoffkunde metallischer Werkstoffe I. B.I.-Wissenschaftsverlag Mannheim/Wien/Zürich, 1980.
- Böhm, H.: Einführung in die Metallkunde. BI-Hochschultaschenbücher, Bd. 196, B.I.-Wissenschaftsverlag Mannheim/Wien/Zürich, 1968.
- Heckel, K.: Einführung in die technische Anwendung der Bruchmechanik. C. Hanser Verlag, München, 1970.
- Reiner, M.: Rheologie in elementarer Darstellung. C. Hanser Verlag, München, 1968.
- Ilchner, B.: Werkstoffwissenschaften. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1982.
- Wellinger, K. und Dietmann, H.: Festigkeitsberechnung. Grundlagen mit technischer Anwendung. A. Kröner Verlag, Stuttgart, 1976.
- Schatt, W. et al.: Einführung in die Werkstoffwissenschaft. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 4. Auflage, 1981.

## 4.2 Verhalten gegenüber Wärme und Kälte

### 4.2.1 Die Bedeutung des Wärmeschutzes

Mit dem baulichen Wärmeschutz – ebenso wie der Feuchtigkeits- und Schallschutz ein Gebiet der Bauphysik – verfolgen wir folgende Ziele:

- Schutz der Nutzer von Bauwerken vor extremen klimatischen Einwirkungen, hier infolge Wärme, Kälte, Sonnenstrahlung usw. und Schaffung eines behaglichen Raumklimas aus Gesundheitsgründen.

- Sparsamer Betrieb von Heiz- bzw. Klimaanlage.
- Schutz des Bauwerkes selbst, da fehlerhafter Wärmeschutz zu Feuchteschäden an den Baustoffen führen kann. Wärme- und Feuchtigkeitsschutz sind miteinander eng verknüpft.

Bei der Realisierung eines befriedigenden Wärmeschutzes spielen die wärmetechnischen Eigenschaften der Baustoffe und Bauteile eine große Rolle ([1] bis [7]). Der Einfluß hoher oder niedriger Temperaturen auf die mechanischen Eigenschaften wird in Abschnitt 5 behandelt.

### 4.2.2 Wärmetechnische Größen

Tab. 4.2.1 Wesentliche wärmetechnische Größen

Größe	Zeichen	SI-Einheit	bisher übliche Einheit	Faktor zu Umrechnung in SI-Einheit
Temperatur	$\vartheta, T$	°C, K	°C, K	1
Temperaturdifferenz	$\Delta\vartheta, \Delta T$	K	grad, °C	1
Wärmemenge, -energie	$Q$	kJ	kcal	4,187
Wärmestrom	$\Phi$	W	kcal/h	1,163
Wärmestromdichte	$q$	W/m <sup>2</sup>	kcal/m <sup>2</sup> h	1,163
spezif. Wärme, Stoffwärme	$c$	kJ/kgK	kcal/kg°C	4,187
Wärmeleitzahl	$\lambda$	W/mK	kcal/mh°C	1,163
Wärmeübergangszahl	$\alpha_i, \alpha_a$	W/m <sup>2</sup> K	kcal/m <sup>2</sup> h°C	1,163
durchströmte Fläche	$F$	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	1
durchströmte Schichtdicke	$d, s$	m	m	1
Stoffröhdichte	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	1
Wärmespeicherfähigkeit, volumenbezogen	$Q'_{sp}$	kJ/m <sup>3</sup> K	kcal/m <sup>3</sup> °C	4,187
Wärmespeicherfähigkeit, flächenbezogen	$Q''_{sp}$	kJ/m <sup>2</sup> K	kcal/m <sup>2</sup> °C	4,187
Temperaturleitzahl	$a$	m <sup>2</sup> /h	m <sup>2</sup> /h	1
Wärmeeindringzahl	$b$	kJ/m <sup>2</sup> Kh <sup>0,5</sup>	kcal/m <sup>2</sup> °Ch <sup>0,5</sup>	4,187
Strahlungszahl	$C, C_s$	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	kcal/m <sup>2</sup> h (°C) <sup>4</sup>	1,163
Strahlungsaustauschzahl	$C_{12}$	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	kcal/m <sup>2</sup> h (°C) <sup>4</sup>	1,163
Emissions-, Absorptionszahl	$\varepsilon, \alpha$	–	–	–
Wärmeübergangszahl, Strahlung	$\alpha_{ST}$	W/m <sup>2</sup> K	kcal/m <sup>2</sup> h°C	1,163
lineare Wärmedehnzahl	$\alpha_t$	10 <sup>-6</sup> /K	10 <sup>-6</sup> /grd	1
volumetrische Wärmedehnzahl	$\alpha_{vt}$	10 <sup>-6</sup> /K	10 <sup>-6</sup> /grd	1

### 4.2.3 Arten der Wärmeübertragung

Die Wärme als physikalischer Begriff ist der Inhalt an kinetischer Energie der Moleküle eines Stoffes. Sie ist unmittelbar mit der Temperatur verbunden und steigt mit deren Zunahme an. Die Wärme unterliegt einem natürlichen Ausgleichsbestreben. Beispiel: Körper, die einander berühren und unterschiedliche Temperaturen besitzen, streben zu einer beiden gemeinsamen Ausgleichstemperatur. Bei der Wärmeübertragung fließt ein Wärmestrom  $\Phi$  von Bereichen höherer zu Bereichen niedrigerer Temperatur.

Wir unterscheiden folgende Arten der Wärmeübertragung:

- Konvektion:** Dies ist die Mitführung von Wärme durch die Teilchen in Gasen und Flüssigkeiten.

- Wärmestrahlung:** Übertragung von Wärme durch Strahlung, ausgehend von den Oberflächen fester Körper.
- Wärmeleitung:** Unmittelbarer Wärmetausch benachbarter Teilchen in festen, flüssigen und gasförmigen Körpern.

Durch die wärmetechnischen Eigenschaften der Baustoffe wird der Wärmestrom beeinflusst, der durch ein Bauteil fließt. Durch die Speicherfähigkeit der Baustoffe wird die Wärmebeharrung (Temperaturträchtigkeit) gesteuert, mit der sich ein Bauteil einer kurzzeitigen Temperaturschwankung widersetzt.



#### 4.2.4 Wärmeleitung im Beharrungszustand

Für den Nachweis winterlichen Wärmeschutzes nach DIN 4108 [N 6, N 7] ist davon auszugehen, daß das umschließende Bauteil von einem kontinuierlichen, zeitunabhängigen Wärmestrom  $\Phi$  durchströmt wird: Durch die Heizung wird die Bauteilinnentemperatur  $\vartheta_i$  konstant gehalten; die Bauteilaußentemperatur  $\vartheta_a$  soll ebenfalls konstant sein (z. B. während einer längeren Kälteperiode). Es stellt sich somit bei der Wärmeübertragung von innen nach außen ein Beharrungszustand ein (stationärer Wärmestrom). Der Wärmestrom durch das Bauteil strömt dabei in Richtung der Normalen auf die Bauteilfläche  $F$  (s. Bild 4.2.1) und ist proportional der Fläche, dem Temperaturgefälle  $\Delta\vartheta/d$  und der Wärmeleitzahl  $\lambda$ . Die Wärmestromdichte (Wärmestrom je Flächeneinheit) beträgt:

$$q = \lambda \frac{\Delta\vartheta}{d} \quad (4.2.1)$$

Bei vorgegebener Bauteildicke und Temperaturdifferenz wird die Wärmestromdichte und damit der Wärmebedarf wesentlich von der Wärmeleitzahl des Baustoffes beeinflusst. Die Wärmeleitfähigkeit, beschrieben durch  $\lambda$ , ist eine Stoffeigenschaft und stellt jene Wärmemenge dar, die durch 1 m<sup>2</sup> Fläche eines 1 m dicken Bauteils bei einem Temperaturunterschied von  $\Delta\vartheta = 1$  K stündlich hindurchströmt. Die Bestimmung von  $\lambda$  erfolgt nach [N 9] bzw. nach [N 8].

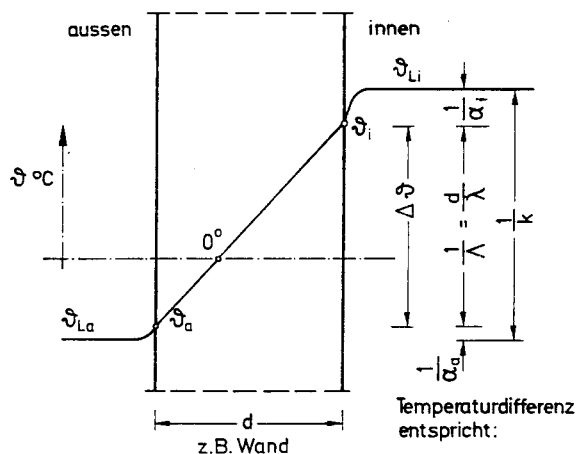


Bild 4.2.1 Wärmedurchgang im Beharrungszustand durch ein einschichtiges Bauteil

Bild 4.2.1 zeigt, daß zwischen der raumseitigen Oberflächentemperatur des Bauteils und der Raumlufttemperatur ein Unterschied besteht. Entsprechendes gilt für die Außenseite. Dieser Unterschied beruht auf dem Wärmeübergang zwischen dem festen Stoff und der Luft, der innerhalb einer dünnen Luftschicht unmittelbar an der Wandoberfläche erfolgt. Die Wärmestromdichte in der innenseitigen Übergangszone läßt sich entsprechend Glg. (4.2.1) darstellen:

$$q = \alpha_i (\vartheta_{Li} - \vartheta_i) \quad (4.2.2)$$

Hierin bedeutet  $\alpha_i$  die Wärmeübergangszahl, die in erster Linie vom Bewegungszustand der Luft (Windgeschwindigkeit) und in zweiter Linie von der Oberflächenbeschaffen-

heit des Bauteils (Rauigkeit) abhängt. Nach DIN 4108 ist z. B. für die Wärmeübergangszahl  $\alpha_i$  an innenseitigen Wandflächen 7 kcal/m<sup>2</sup>h°C bzw. 8 W/m<sup>2</sup>K anzusetzen. Bei Außenwandflächen beträgt  $\alpha_a = 20$  kcal/m<sup>2</sup>h°C bzw. 23 W/m<sup>2</sup>K.

Zur Beurteilung des Wärmedämmvermögens sind Einheitsgrößen eingeführt worden. Die Wärmestromdichte bezogen auf die Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta$  nach Glg. (4.2.1) nennt man die Wärmedurchlaßzahl.

$$\Lambda = \frac{\lambda}{d} \quad (4.2.3)$$

bzw. deren Kehrwert wird als Wärmedurchlaßwiderstand [N 8] bezeichnet:

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{d}{\lambda} \quad (4.2.4)$$

Bei der Auslegung der erforderlichen Heizleistung sind die Zonen des Wärmeüberganges mit einzubeziehen, da sie gleichsam als dämmende Schichten den Wärmedurchgangswiderstand  $1/k$  mit beeinflussen.

Dieser ist wie folgt definiert (Einheit m<sup>2</sup>K/W oder m<sup>2</sup>h grad/kcal):

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{\alpha_a} \quad (4.2.5)$$

Der Wärmedurchlaßwiderstand  $1/\Lambda$  dient der Beurteilung des Wärmeschutzes. Er steigt mit zunehmender Schichtdicke und abnehmender Wärmeleitzahl  $\lambda$  an. Bei einem mehrschichtigen Bauteil setzt sich der Wärmedurchlaßwiderstand aus den Teilwiderständen der einzelnen Schichten zusammen, s. Bild 4.2.2:

$$\frac{1}{\Lambda} = \sum \frac{d_i}{\lambda_i} \quad (4.2.6)$$

In DIN 4108 sind die Wärmeleitzahlen der Baustoffe tabelliert, Tab. 4.2.2 enthält einen Auszug hieraus. Die Wärmeleitzahlen sind Rechenwerte, die neben Streuungen in den Baustoffeigenschaften u. a. auch den Einfluß der sog. praktischen Feuchte (s. Abschnitt 4.3) der Stoffe berücksichtigen.

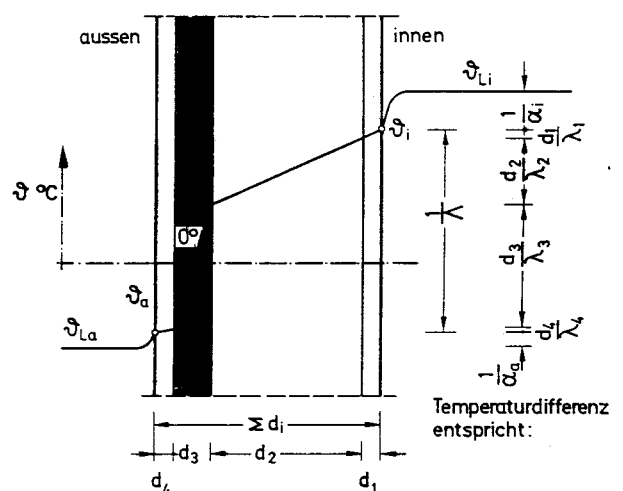


Bild 4.2.2 Wärmedurchgang im Beharrungszustand durch ein mehrschichtiges Bauteil

Tab. 4.2.2 Zahlenwerte der Wärmeleitzahl und Rohdichte (Rechenwerte nach DIN 4108)

Stoff		Rohdichte	Wärmeleitzahl	
		$\rho$	$\lambda$	
		kg/m <sup>3</sup>	kcal/mhgrd	W/mK
Steine, Mörtel, Betone	dichte Natursteine		3,00	3,50
	porige Natursteine		2,00	2,30
	Gipsmörtel	1700	0,60	0,70
	Kalkmörtel	1900	0,75	0,87
	Zementmörtel	2200	1,20	1,40
	Normalbeton	2400	1,75	2,04
	Bimsbeton, porig	800	0,25	0,29
	Leichtbeton, dicht	1700	0,70	0,80
	Gasbeton	600	0,20	0,23
Mauerwerk	Kalksandstein, Vollstein	1800	0,85	1,00
	Kalksandstein, Lochstein	1400	0,60	0,70
	Ziegel-MW, Vollstein	1800	0,68	0,80
	Ziegel-MW, Lochziegel	1200	0,45	0,52
	Gasbeton-MW	800	0,35	0,40
Holz und -werkstoffe	Fichte	600	0,12	0,14
	Eiche	900	0,18	0,21
	Sperrholz	600	0,12	0,14
	Faserplatten	300	0,050	0,06
	Preßplatten	400	0,085	0,10
Dämmstoffe	Mineral. Faserstoffe	100	0,035	0,04
	Pflanzl. Faserstoffe	100	0,040	0,05
	Holzwoleleichtbauplatten	200	0,080	0,09
	Korkplatten	160	0,038	0,04
	Schaumkunststoffe	25	0,035	0,04
sonst. Stoffe	Kunststoffe, dicht	1100	0,070	0,08
	Glas	2500	1,00	1,16
	Stahl	7850	50	58
	Aluminium	2700	145	168
	Blei	11300	30	35
	Kupfer	9000	320	370

#### Einflüsse auf die Wärmeleitzahl

Die Wärmeleitzahl wird von folgenden Eigenschaften beeinflusst: Struktur, Porosität und Rohdichte; Feuchtigkeitsgehalt und Temperatur.

##### a) Einfluß von Struktur, Porosität und Rohdichte

Wegen der größeren Packungsdichte im atomaren Stoffgerüst besitzen kristalline Stoffe eine größere Wärmeleitzahl als amorphe bzw. technisch amorphe Stoffe.

Alle üblichen Konstruktionsbaustoffe, die außer der tragenden auch noch eine dämmende Funktion besitzen (z.B. Ziegelmauerwerk) sowie jene Baustoffe, die vorzugsweise der Wärmedämmung dienen (Dämmstoffe; z.B. Kunstharzschäum), sind keine dichten Stoffe im strengen Sinn, sondern weisen eine bestimmte, unvermeidbare oder gezielt hergestellte Porosität auf, wobei unter Porosität das Verhältnis des Porenvolumens zum Gesamtvolumen verstanden wird. Die Porosität entsteht durch Einschlüsse stehender Luft (Mikroporen im Gasbeton oder Luftkammern im Hochlochziegel), die eine niedrige Wärmeleitzahl besitzt. Für

Baustoffe ähnlicher bis gleicher chemischer Zusammensetzung kann der Einfluß der Porosität durch die Rohdichte ausgedrückt werden, s. Bilder 4.2.3 und 4.2.4 [1]: Die Wärmeleitzahl steigt mit Zunahme der Rohdichte bzw. mit Abnahme der Porosität an.

##### b) Einfluß der Feuchtigkeit

Von großem Einfluß auf die Wärmeleitfähigkeit ist die Feuchtigkeit im Baustoff: Mit zunehmendem Feuchtegehalt nimmt die Wärmeleitzahl zu und damit der Wärmedurchlaßwiderstand ab. Die Erklärung hierfür ist im großen Unterschied der Wärmeleitzahlen stehender Luft ( $\lambda_L = 0,022 \text{ W/mK}$ ) und von Wasser ( $\lambda_W = 0,6 \text{ W/mK}$ ) zu suchen und beruht außerdem auf der Tatsache, daß bei Zunahme der Feuchte in den Poren ein Großteil der Wärme durch Wasserdampfdiffusion transportiert wird. Es ist also wichtig, wärmedämmende Baustoffe vor Durchfeuchtung zu schützen (Aufgabe des Bautenschutzes), damit einerseits der Aufwand an Heizenergie nicht ansteigt und andererseits die Gesundheit der Nutzer nicht gefährdet wird.

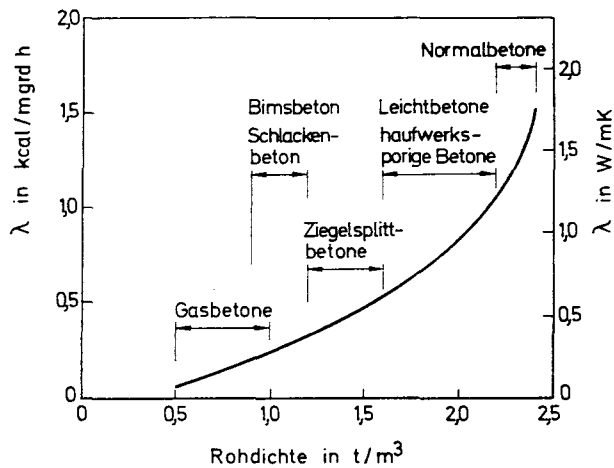


Bild 4.2.3 Wärmeleitzahlen verschiedener Betone

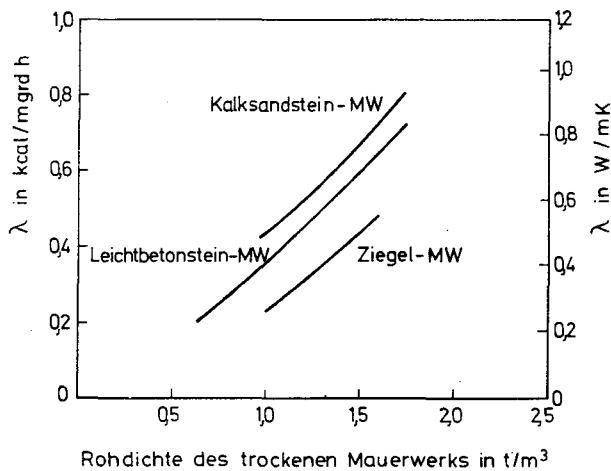


Bild 4.2.4 Wärmeleitzahlen  $\lambda$  von Mauerwerk aus Steinen verschiedener Art, Größe und Lochanordnung

Bild 4.2.5 zeigt wie die Wärmeleitzahl einiger Konstruktionsbaustoffe, die aber auch der Wärmedämmung dienen, mit zunehmender Feuchte ansteigt [1]. Bei organischen Dämmstoffen ist die Zunahme noch ausgeprägter, wie Bild 4.2.6 für einige Schaumkunststoffe zeigt [1].

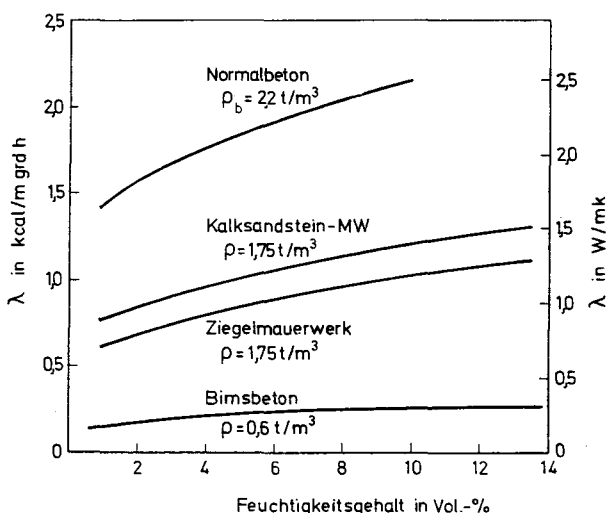


Bild 4.2.5 Zunahme der Wärmeleitzahl mit steigender Feuchte für einige anorganische Baustoffe

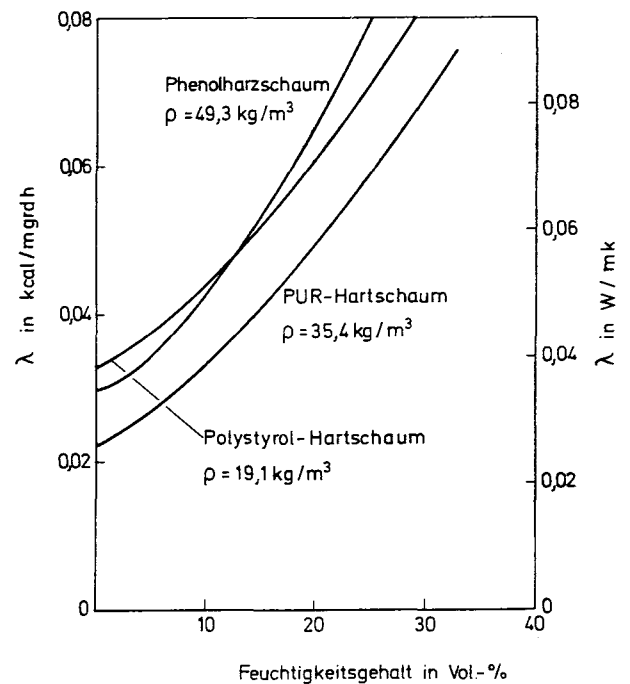


Bild 4.2.6 Zunahme der Wärmeleitzahl mit steigender Feuchte für einige Schaumkunststoffe

#### c) Einfluß der Temperatur

Die Wärmeleitfähigkeit nimmt zwischen 0 und 100 °C mit Zunahme der Temperatur zu: um rund 0,1%/grd bei den Konstruktionsbaustoffen bzw. um rund 0,4%/grd bei den Baudämmstoffen. Wegen der hohen Wärmeleitzahl des Eises von rund 2,3 W/mK steigt die Wärmeleitzahl eines porösen Baustoffes, der Feuchte enthält, am Gefrierpunkt des Wassers stark an.

### 4.2.5 Wärmeleitung im instationären Zustand

#### 4.2.5.1 Temperatursgleichungsprozeß

Für die Auslegung des winterlichen Wärmeschutzes und der Heizanlage ist vom Beharrungszustand (stationärer Wärme flu ß) auszugehen. Der Beharrungszustand stellt sich jedoch bei einem plötzlichen Einbruch von Kälte nicht sofort, sondern erst allmählich ein, weil die thermische Trägheit z.B. der Außenwand verzögernd wirkt. Der Vorgang der Anpassung an den stationären Zustand wird Temperatursgleichungsprozeß genannt [6].

Dieser Prozeß soll am Beispiel einer einschichtigen Außenwand (s. Bild 4.2.7) geschildert werden. Wir gehen zunächst davon aus, daß die Lufttemperaturen innen und außen, ebenso wie die Wandtemperatur gleich sind und 20 °C betragen. Ein plötzlicher Nachtfrost führe nun zu einem Abfall der Außentemperatur. Die Raumlufttemperatur hingegen wird durch die Heizung weiter auf 20 °C gehalten. Diesem Temperatursturz folgt die Wand nur zögernd nach. Im Zeitpunkt  $t_A$  ist dann die geradlinige Temperaturverteilung des Beharrungszustandes erreicht. Bei einer plötzlichen Erwärmung läuft der Vorgang in gleicher Weise, jedoch in umgekehrter Richtung, ab. Die Geschwindigkeit, mit der

der Beharrungszustand angestrebt wird, ist von der Wanddicke, vor allem aber von der Wärmeleitzahl, der Stoffwärme und der Rohdichte des Wandbaustoffes abhängig. Die Gesamtheit des Verhaltens bei instationären Temperaturvorgängen wird von den Begriffen Temperaturträgheit, Speichervermögen u.a.m. beschrieben. Dieses Verhalten von Baustoffen ist von Bedeutung bei Unstetigkeiten im Heizbetrieb (An- und Abschaltvorgänge, Störungen usw.), bei kurzzeitigen Schwankungen der Außentemperatur und für das Aufheizen der Wandoberflächen durch Sonneneinstrahlung.

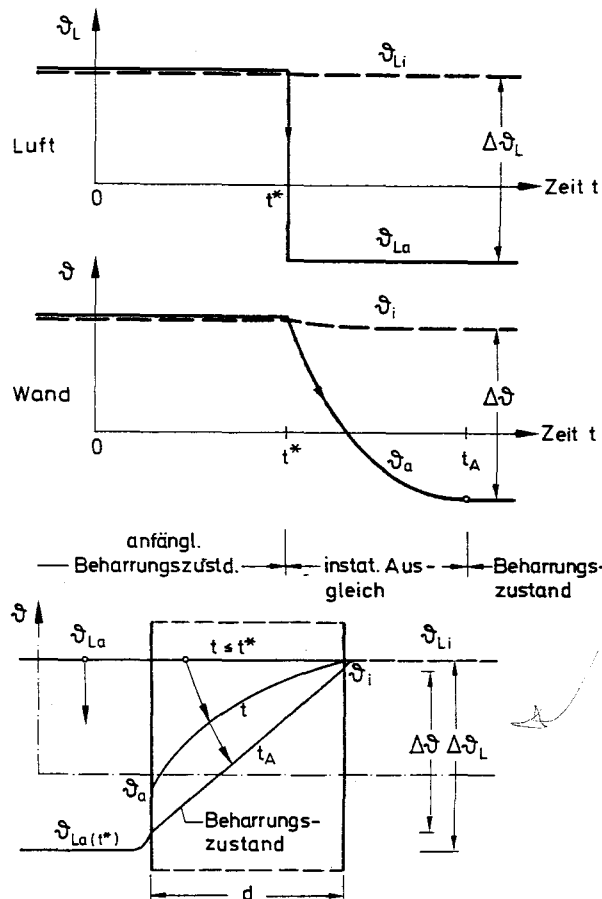


Bild 4.2.7 Temperaturausgleich bei plötzlicher Abkühlung

#### 4.2.5.2 Stoffwärme und Wärmespeicherfähigkeit

Außenbauteile müssen eine gewisse Wärmespeicherfähigkeit aufweisen, damit bei kurzzeitigen Schwankungen der Temperatur der Außenluft die Raumtemperatur i.w. konstant bleibt. Die Wärmespeicherfähigkeit wird von den Baustoffeigenschaften Rohdichte und Stoffwärme (auch spezifische Wärme genannt) bestimmt.

Stellen wir uns den umgekehrten Fall von Bild 4.2.7 vor: Es findet eine plötzliche Zunahme der Außentemperatur statt. In Bild 4.2.8 ist die Temperaturverteilung zu einem beliebigen Zeitpunkt t dargestellt; der Beharrungszustand ist noch nicht erreicht. Durch eine Stoffschicht der Dicke s und Fläche F tritt von links folgender Wärmestrom ein, Einheit kcal/h oder W:

$$\Phi_{\text{ein}} = \lambda F \left( \frac{\Delta \theta}{\Delta x} \right)_{x_0} \quad (4.2.7)$$

Auf der rechten Seite hingegen tritt aus:

$$\Phi_{\text{aus}} = \lambda F \left( \frac{\Delta \theta}{\Delta x} \right)_{x_0 + s} \quad (4.2.8)$$

Diese Wärmeströme sind ungleich, weil auch die Gefälle  $\Delta \theta / \Delta x$  an den Schichträndern unterschiedlich sind. Es tritt mehr Wärme ein als ausfließt. Damit wird in der Schicht Wärme gespeichert, die der Differenz der Ströme entspricht und die i.w. von der Stoffwärme und Rohdichte abhängt.

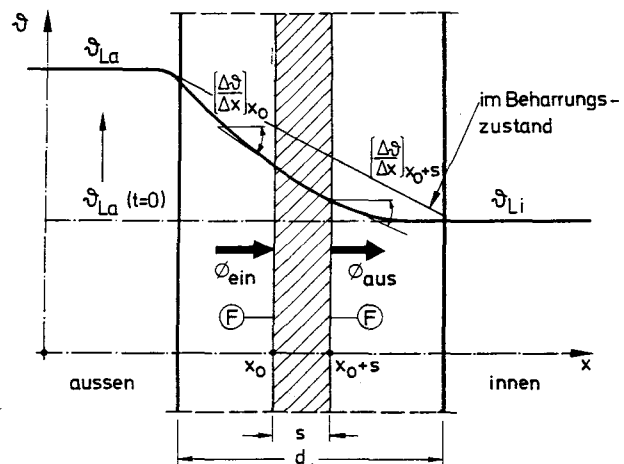


Bild 4.2.8 Vorgänge beim Temperaturausgleich (plötzliche Erwärmung der Außenluft)

Die Stoffwärme c ist diejenige Wärmemenge, die ein Körper mit der Masse 1 kg bei einer Erwärmung um 1 K aufnimmt bzw. bei einer Abkühlung um 1 K abgibt. Mit der Stoffwärme kann man den Wärmeinhalt von Körpern bei bestimmten Temperaturen bzw. auch die Temperaturänderungen bei Zufuhr oder Entzug von Wärme bestimmen. Tab. 4.2.3 enthält Zahlenwerte der Stoffwärme c einiger Baustoffe. Sie ist von der Rohdichte nicht abhängig und bewegt sich in relativ schmalen Grenzen. Die Abhängigkeit von der Temperatur ist gering; bei Zunahme der Feuchtigkeit steigt c an.

Mit Stoffwärme und Rohdichte kann man die Wärmespeicherfähigkeit eines Baustoffes über die volumenbezogene Wärmespeicherfähigkeit

$$Q'_{\text{sp}} = c \varrho \quad [\text{kcal/m}^3 \text{grd oder kJ/m}^3 \text{K}] \quad (4.2.9)$$

bzw. über die flächenbezogene Wärmespeicherfähigkeit für ein flächiges Bauteil der Dicke d

$$Q''_{\text{sp}} = c \varrho d \quad [\text{kcal/m}^2 \text{grd oder kJ/m}^2 \text{K}] \quad (4.2.10)$$

angeben. Da sich die erforderliche Schichtdicke d eines einschichtigen Außenbauteils über den erforderlichen Wärmedurchlaßwiderstand  $1/\Lambda$  ergibt, lassen sich mit der flächenbezogenen Wärmespeicherfähigkeit Vergleiche zwischen den verschiedenen Baustoffen führen. Es ist mit Glg. (4.2.10) und wegen

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{d}{\lambda} \quad (4.2.4)$$

$$Q''_{\text{sp}} = \frac{c \varrho \lambda}{\Lambda} \quad (4.2.11)$$

In Tab. 4.2.3 sind einige Zahlenwerte von  $Q'_{sp}$  und  $Q''_{sp}$  aufgeführt, wobei ein Wärmedurchlaßwiderstand von 0,55  $m^2gradh/kcal$  entsprechend Wärmedämmgebiet II von DIN 4108 angesetzt wurde. Bild 4.2.9 gibt die Abhängigkeit der Speicherfähigkeit abhängig von der Rohdichte für einige Stoffgruppen wieder. Die Speicherfähigkeit eines Baustoffes steigt mit dessen Rohdichte an.

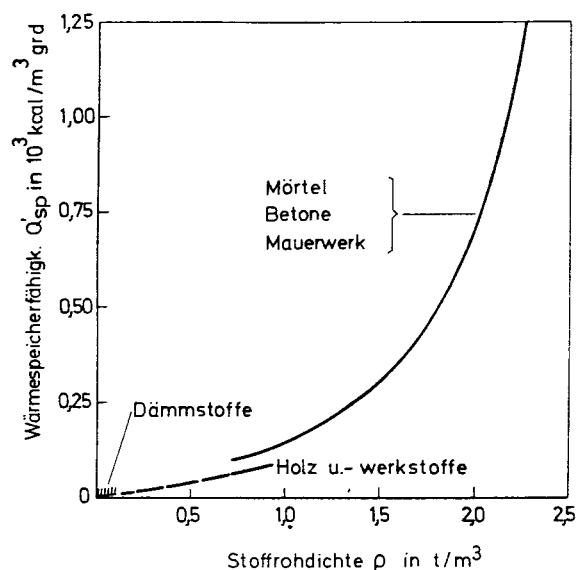


Bild 4.2.9 Wärmespeicherfähigkeit einiger Baustoffgruppen abhängig von der Rohdichte

Tab. 4.2.3 Zahlenwerte der spezifischen Wärme, Rohdichte und Wärmespeicherfähigkeit (gerundete Mittelwerte aus verschiedenen Quellen, SI-Einheiten s. Tab. 4.2.1)

Stoff		spezifische Wärme i. M.	Stoffrohichte i. M.	Wärmespeicherfähigkeit	
				volumenbezogen	flächenbezogen $\frac{1}{\Lambda} = 0,55$
		c kcal/kggrd	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$Q'_{sp}$ kcal/m <sup>3</sup> grad	$Q''_{sp}$ kcal/m <sup>2</sup> grad
Mörtel u. Betone	Gipsmörtel	0,20	1700	380	410
	Kalkmörtel	0,21	1900	400	575
	Zementmörtel	0,21	2200	460	1000
	Normalbeton	0,25	240	600	1900
	Bimsbeton, porig	0,25	800	200	90
	Leichtbeton, dicht	0,25	1800	450	490
	Gasbeton	0,25	600	150	55
Mauerwerk	Kalksandstein, Vollsteine	0,20	1800	360	560
	Vollziegel	0,20	1800	360	440
	Lochziegel	0,20	1200	240	175
	Gasbeton	0,20	800	160	101
Holz u. -werkstoffe	Fichte	0,35	600	200	45
	Sperrholz	0,35	600	200	45
	Faserplatten	0,35	300	105	20
	Preßplatten	0,35	400	140	40
Dämmstoffe	Mineral. Faserstoffe	0,20	100	20	1
	Pflanzl. Faserstoffe	0,25	100	25	2
	Holzwoleleichtbauplatten	0,32	200	65	4
	Korkplatten	0,40	160	65	4
	Schaumkunststoffe	0,33	25	8	0,5
sonst. Stoffe	Kunststoffe, dicht	0,30	1100	330	40
	Glas	0,20	2500	500	640
	Stahl	0,12	7850	940	$9 \cdot 10^4$
	Aluminium	0,22	2700	320	$8 \cdot 10^4$
	Blei	0,03	11300	340	$2 \cdot 10^4$
	Kupfer	0,09	9000	810	$50 \cdot 10^4$

### 4.2.5.3 Temperaturleitfähigkeit und Wärmeeindringverhalten

Die Geschwindigkeit des Ausbreitens eines Temperaturfeldes in einem Körper, also der Annäherung an den Beharrungszustand, hängt von der Temperaturleitfähigkeit  $a$  des Stoffes ab.

Zur Definition von  $a$  kehren wir zu den Gln. (4.2.7) und (4.2.8) zurück und schreiben die Bilanz der Wärmemengen/Zeit an:

$$\Phi_{\text{ein}} - \Phi_{\text{aus}} = \Phi_{\text{sp}} \quad (4.2.12)$$

Hierin ist  $\Phi_{\text{sp}}$  die je Zeiteinheit im Streifen mit dem Volumen  $s \cdot F$  gespeicherte Wärme:

$$\Phi_{\text{sp}} = c \rho s F \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = Q''_{\text{so}} F \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \quad (4.2.13)$$

Wir erhalten dann:

$$\frac{\lambda}{c \rho} \left[ \left( \frac{\Delta \theta}{\Delta x} \right)_{x_0} - \left( \frac{\Delta \theta}{\Delta x} \right)_{x_0 + s} \right] = s \frac{\Delta \theta}{\Delta t}$$

Als Temperaturleitfähigkeit oder Temperaturleitzahl wird bezeichnet:

$$a = \frac{\lambda}{c \rho} = \frac{\text{Wärmeleitfähigkeit}}{\text{Wärmespeicherefähigkeit}} \quad (4.2.14)$$

Je größer die Temperaturleitfähigkeit ist, umso schneller steigt die Temperatur an beliebiger Stelle an. Tab. 4.2.4 enthält einige Zahlenwerte. Durch die Temperaturleitzahl wird auch die thermische Trägheit bei Schwankungen der Außentemperatur beschrieben. Die Temperaturschwankungen der Außenluft werden sich im umschließenden Bauteil umso stärker abgedämpft auswirken, je kleiner die Temperaturleitzahl ist [10 bis 12].

Das Temperaturverhalten im Oberflächenbereich eines Stoffes bei kurzzeitigen Temperaturveränderungen wird durch das Wärmeeindringverhalten oder Wärmeableitvermögen beschrieben. Hierzu einige Beispiele: Erwärmen

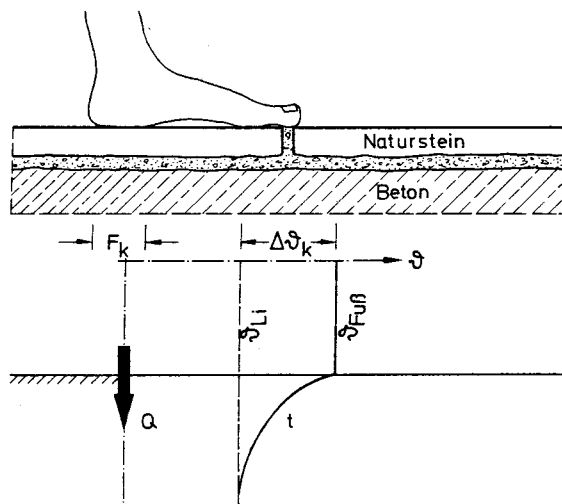


Bild 4.2.10 Vorgang der Wärmeableitung

(Wärmeentzug) der Innenflächen von Bauteilen bei kurzzeitiger Heizung; Wärmeableitung beim Begehen eines Fußbodens (Fußwärme) oder beim Berühren einer Wand u. a. m.

Bild 4.2.10 zeigt den Vorgang der Wärmeableitung am Beispiel des Fußbodens. Dem Fuß wird Wärme entzogen. Diese Wärmemenge beträgt bis zur Zeit  $t$ :

$$Q \approx \sqrt{c \rho \lambda} \cdot \Delta \theta_k \cdot \sqrt{t} \cdot F_k \quad (4.2.15)$$

Als Wärmeeindringzahl  $b$  wird bezeichnet:

$$b = \sqrt{c \rho \lambda} \quad (4.2.16)$$

In Tab. 4.2.4 sind einige Zahlenwerte aufgeführt; Bild 4.2.11 zeigt die Abhängigkeit von der Rohdichte. Die Wärmeeindringzahl nimmt mit steigender Rohdichte zu. Ein schwerer Stoff entzieht bei Berührung mehr Wärme als ein leichter. Die schweren Baustoffe fühlen sich »kälter« an als Holz oder Dämmstoffe.

Tab. 4.2.4 Zahlenwerte der Temperaturleitfähigkeit und Wärmeeindringzahl (gerundete Mittelwerte, SI-Einheiten s. Tab. 4.2.1)

Stoff		Temperaturleitfähigkeit	Wärmeeindringzahl
		$a$	$b$
		$10^4 \text{ m}^2/\text{h}$	$\text{kcal}/\text{m}^2\text{grad h}^{1/2}$
Mörtel, Betone, MW	Gipsmörtel	16	15
	Kalkmörtel	19	17
	Zementmörtel	26	23
	Normalbeton	29	32
	Bimsbeton, porig	13	7
	Leichtbeton, dicht	13	16
	Gasbeton	13	5
	Naturstein, dicht	57	40
	Betonwerkstein	29	32
	Kalksandstein-MW (Vollstein)	24	17
	Ziegelmauerwerk (Vollstein)	19	16
Holz- u. -werkstoffe	Fichte	6	5
	Sperrholz	6	5
	Faserplatten	14	4
	Preßplatten	6	3
Dämmstoffe	Mineralfaserstoffe	18	1
	Pflanzl. Faserst.	16	1
	Holzwolle-LbPl.	12	2
	Korkplatten	6	1,5
	Schaumkunststoffe	44	0,5
sonst. Stoffe	Kunststoffe, dicht	2	5
	Glas	14	19
	Stahl	530	215
	Aluminium	4400	215

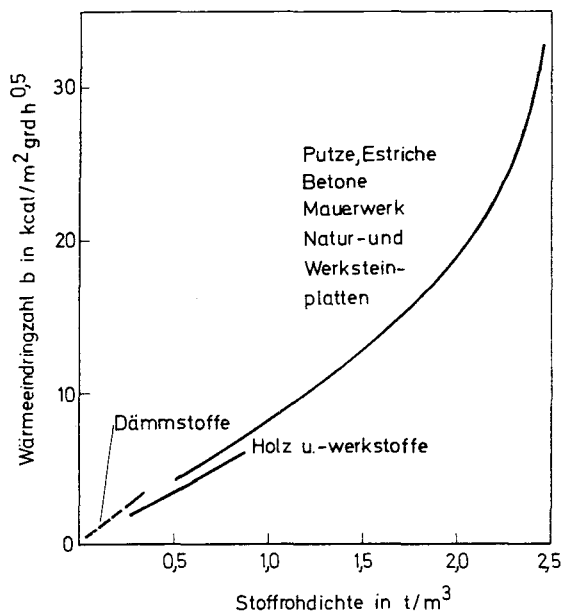


Bild 4.2.11 Wärmeindringzahl  $b$  einiger Baustoffgruppen abhängig von der Rohdichte

## 4.2.6 Wärmeübertragung durch Strahlung

### 4.2.6.1 Zur bautechnischen Bedeutung

Während in Abschnitt »Lichttechnisches Verhalten von Baustoffen« ein Abriß über die grundlegenden Zusammenhänge von Strahlung gegeben wird, soll sich dieser Abschnitt mit dem Vorgang des Wärmetausches infolge von Strahlung zwischen Körpern befassen. Dabei werden solche Stoffe betrachtet, die strahlungsundurchlässig sind und die eine Höchsttemperatur von  $\vartheta < 200^\circ\text{C}$  aufweisen. Die bautechnische Bedeutung des Wärmetausches infolge Strahlung liegt in folgenden Bereichen:

- Aufheizung der Außenflächen von umschließenden Bauteilen durch Besonnung;
- Erwärmung des menschlichen Körpers durch Strahlungsaustausch mit ihm umgebenden Gegenständen und Bauteilen;
- Wärmetausch infolge Strahlung von Gegenständen und Bauteilen im Raum.

Strahlen sind elektromagnetische Schwingungen (Wellen), die von einem strahlenden Körper ausgesandt werden und die sich beim Auftreffen auf einen angestrahlten Körper durch Absorption zu Wärmeenergie verwandeln. Es ist deshalb zulässig, summarisch von Wärmestrahlen zu sprechen, obgleich es deutliche Unterschiede in den Wellenlängen der unterschiedlichen Strahlungsarten gibt (s. [N 1], [N 4], [N 5]).

Die von der Sonne emittierten, kurzwelligen und sichtbaren Wärmestrahlen liegen in einem Wellenlängenbereich von rund  $0,4\ \mu\text{m}$  bis rund  $0,8\ \mu\text{m}$  ( $1\ \mu\text{m} \triangleq 10^{-3}\ \text{mm}$ ). Die von Gegenständen wie z.B. Heizkörpern emittierte Wärmestrahlung ist hingegen langwellig. Die Wellenlänge hängt von der Temperatur des Strahlers ab und ist umso größer, je niedriger die Temperatur ist.

### 4.2.6.2 Umwandlung von Strahlung in Wärme

Die Erwärmung eines Körpers durch Absorption von Wärmestrahlung hängt von dessen Absorptions- und Emissionsvermögen ab. Beim strahlungsundurchlässigen Körper wird ein Teil der auftreffenden Wärmestrahlen absorbiert und ein anderer reflektiert.

Das Absorptionsvermögen, ausgedrückt durch die absorbierte Wärmestromdichte  $q_A$ , ergibt sich als Differenz des ankommenden Wärmestroms  $q_{ST}$  der Strahlung und des reflektierten Wärmestroms  $q_R$ :

$$q_A = q_{ST} - q_R \quad [\text{kcal/m}^2\text{h}] \quad (4.2.17)$$

Teilen wir Glg. (4.2.17) durch  $q_{ST}$ , dann erhalten wir in bezogener Form:

$$\frac{q_A}{q_{ST}} = 1 - \frac{q_R}{q_{ST}} \quad (4.2.18)$$

oder

$$\alpha = 1 - \rho$$

Das Verhältnis  $q_A/q_{ST}$  ist die Absorptionszahl  $\alpha$ ; es gibt an, welcher Anteil der Strahlung im Körper absorbiert wurde. Das Verhältnis  $q_R/q_{ST}$  bezeichnen wir als Reflexionszahl  $\rho$ , die aussagt, wieviel von der Strahlung  $q_{ST}$  wieder reflektiert wurde. Das Absorptionsvermögen hängt – wie noch gezeigt werden wird – von der Art und Farbe des Stoffes, sowie von der Oberflächenbeschaffenheit des Körpers ab. Es folgt, daß ein hohes Absorptionsvermögen immer mit einem kleinen Reflexionsvermögen verknüpft sein muß und umgekehrt. Der sogenannte »schwarze Körper« absorbiert die auf ihn treffende Strahlung vollständig, die Reflexion wird zu null. Für ihn gilt also:

$$\begin{aligned} \alpha_s &= 1 \\ \rho_s &= 0 \end{aligned} \quad (4.2.19)$$

Ein erwärmter Körper emittiert nun selbst wieder Wärmestrahlen, deren Wärmestromdichte  $q_E$  von der Temperatur und dem Emissionsvermögen des Stoffes abhängt. Beim »schwarzen Körper« beträgt die emittierte Wärmestromdichte nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$q_{Es} = C_s \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad [\text{kcal/m}^2\text{h}] \quad (4.2.20)$$

wobei  $C_s$  die Strahlungszahl des »schwarzen Körpers« ist:  $C_s = 4,965\ \text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{K}^4$  oder  $5,77\ \text{W/m}^2\text{K}^4$ .  $T$  ist die absolute Temperatur in K-Graden.

Das Emissionsvermögen eines beliebigen technischen Körpers, als grauer Körper bezeichnet, kann man über den schwarzen Körper ausdrücken:

$$q_E = q_{Es} \frac{C}{C_s} \quad (4.2.21)$$

oder

$$q_E = C \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (4.2.22)$$

wobei  $C$  die dem Stoff entsprechende Strahlungszahl ist. Tab. 4.2.5 gibt einen Überblick über die Strahlungszahlen wichtiger Baustoffe. Abgesehen von hellen Metallflächen

und Anstrichen, sind nahezu alle Stoffe im Bereich von 0 bis 100 °C als graue bis schwarze Körper einstuftbar. Das Emissionsvermögen eines Körpers drücken wir als das Verhältnis des vom Körper emittierten Wärmestromes zu dem des schwarzen Körpers aus;  $\varepsilon$  ist als Emissionszahl definiert:

$$\varepsilon = \frac{q_E}{q_{Es}} = \frac{C}{C_s} \quad (4.2.23)$$

Der schwarze Körper besitzt also die Emissionszahl  $\varepsilon_s = 1$ . Der Zusammenhang zwischen dem Absorptions- und Emissionsvermögen wird durch das Kirchhoff'sche Gesetz hergestellt. Hiernach ist das Verhältnis des Emissions- zum Absorptionsvermögen eines jeden Körpers gleich und i. w. nur von der Temperatur abhängig. Vergleichen wir einen beliebigen Körper mit einem schwarzen Körper, so gilt:

$$\frac{q_E}{q_A} = \frac{q_{Es}}{q_{As}} \quad (4.2.24)$$

bzw.

$$q_A = \varepsilon q_{As} \quad (4.2.25)$$

oder

$$\alpha = \varepsilon = \frac{C}{C_s} \quad (4.2.26)$$

Also: Absorptionsvermögen und Emissionsvermögen entsprechen einander. Körper mit einem hohen Absorptionsvermögen vermögen auch viel Wärme als Strahlung zu emittieren. In Tab. 4.2.5 sind die Emissions- bzw. Absorptionsszahlen einiger Baustoffe enthalten.

#### 4.2.6.3 Erwärmung durch Sonnenstrahlen

Durch die Strahlung der Sonne werden erfahrungsgemäß die Oberflächen abschließender Bauteile, v. a. wenn diese dunkle Farben besitzen, beträchtlich aufgeheizt. Abhängig vom Wärmeeindringvermögen und anderen thermischen Eigenschaften des Bauteils kann hierdurch das Raumklima nachhaltig beeinflusst werden.

Die Intensität der Sonnenstrahlung auf ein Bauteil, die sich aus dem direkten und dem diffusen Strahlungsanteil zusammensetzt, hängt neben meteorologischen und klimatischen Parametern auch von der Himmelsrichtung und der Neigung des Bauteils ab. Bild 4.2.12 zeigt den tageszeitlichen Verlauf der Intensität auf unterschiedlich orientierte Flächen im Hochsommer [8]. Zur Sonnenstrahlung treten noch Wärmestrahlen aus der Umgebung hinzu. Faßt man beide Einflüsse zur Dichte  $q_{ST}$  der Sonnenstrahlung zusammen, so treten durch die Bauteilaußenfläche eine Reihe z. T. entgegengesetzt gerichteter Wärmeströme, s. Bild 4.2.13:

a) Eintretender Wärmestrom infolge Sonnen- und Umgebungsstrahlen (Absorption von Strahlung):

$$q_A = q_{ST} \cdot \alpha \quad (4.2.27)$$

b) Eintretender Wärmestrom durch konvektiven Wärme-tausch (Wärmeübergang); s. Abschn. 4.2.4:

$$q_K = \alpha_a \cdot (\vartheta_{La} - \vartheta_a) \quad (4.2.28)$$

c) Austretender Wärmestrom infolge Emission von Wärmestrahlen ( $T_a$  entspricht  $\vartheta_a$  in K)

$$q_E = \alpha C_s \left( \frac{T_a}{100} \right)^4 \quad (4.2.29)$$

wobei  $\alpha = \varepsilon$

Tab. 4.2.5 Strahlungszahlen und Emissions-(= Absorptions)zahlen einiger Stoffe (gerundete Mittelwerte aus verschiedenen Quellen)

Stoff		Strahlungszahl C zwischen 0–100 °C		Emissionszahl $\varepsilon$ bei rd. 20 °C
		W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	kcal/m <sup>2</sup> hgrd <sup>4</sup>	–
Anstriche	Kupfer, poliert	0,18	0,15	0,030
	Nickel, poliert	0,26	0,22	0,045
	Aluminium, walzblank	0,23	0,20	0,040
	Stahl, geschmirlgelt	1,40	1,20	0,24
	Stahl, Walzhaut	5,23	4,57	0,77
	Stahl, verrostet	4,90	4,21	0,61
	Blei, oxidiert	1,63	1,40	0,80
verschiedene Stoffe	Dachpappe	5,35	4,60	0,85–0,90
	Gips	5,23	4,50	0,90
	Glas	5,40	4,64	0,94
	Ziegelstein, Mörtel, Putz	5,35	4,50	0,93
	Holz	5,40	4,64	0,94
	Porzellan	5,35	4,60	0,93
Metalle	Emaillack, schwarz	5,25	4,50	0,95
	Emaillack, weiß	5,23	4,50	0,20
	Spirituslack, schwarz	4,80	4,15	0,97
	Heizkörperlack	5,40	4,64	0,93
	Ölfarben etc. dunkel	4,9–5,5	4,2–4,75	0,90
	absolut schwarze Körper	5,77	4,965	1,000



Damit ist die gesamte Wärmestromdichte:

$$q = q_A + q_k + q_E = q_{ST} \varepsilon + \alpha_k (\vartheta_{La} - \vartheta_a) - \varepsilon C_s \left( \frac{T_a}{100} \right)^4 \quad (4.2.30)$$

Sie führt, wie Bild 4.2.13 zeigt, zu einer Aufheizung der Wandaußenseite, deren Temperatur weit über der tatsächlichen Lufttemperatur liegt und die durch die sog. Strahlungslufttemperatur  $\vartheta_{La}^*$  beschrieben wird. Durch den Tagesgang der Sonne wird der Beharrungszustand nicht erreicht. Schwere Baustoffe folgen dem zyklischen Verlauf der Strahlungstemperatur zeitverschieben und gedämpft nach. Leichte Baustoffe folgen wegen ihres geringen Wärmeeindringwiderstandes der Strahlungstemperatur rascher. Wie sich die Farbe des Bauteils auf die Oberflächentemperatur auswirkt, zeigt Bild 4.2.14 [9].

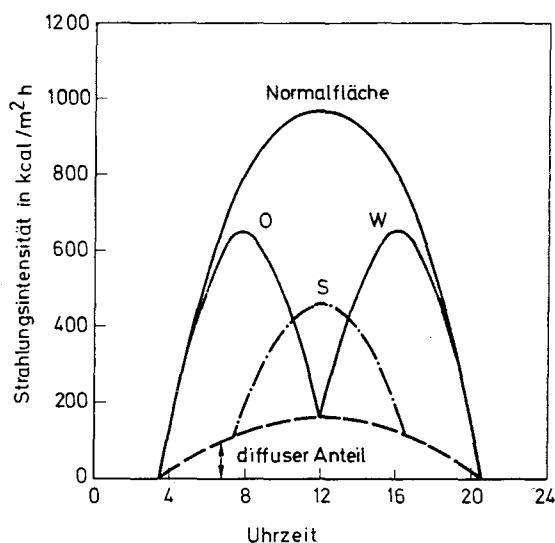


Bild 4.2.12 Sonnenstrahlung auf nach Osten, Süden und Westen orientierte Wände sowie auf eine Dachfläche im Hochsommer

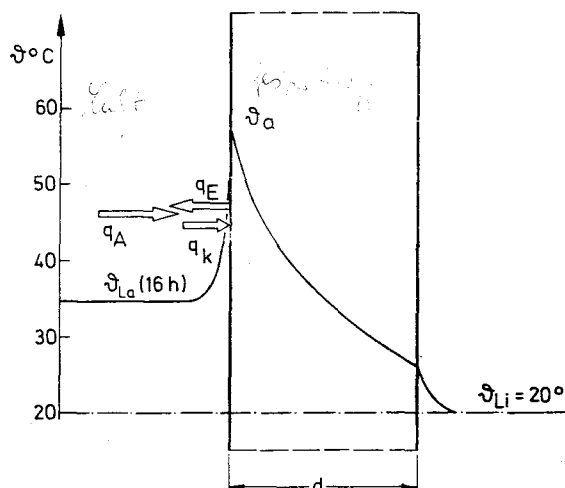


Bild 4.2.13 Aufheizung einer Wand durch Sonnenstrahlung (schematisch)

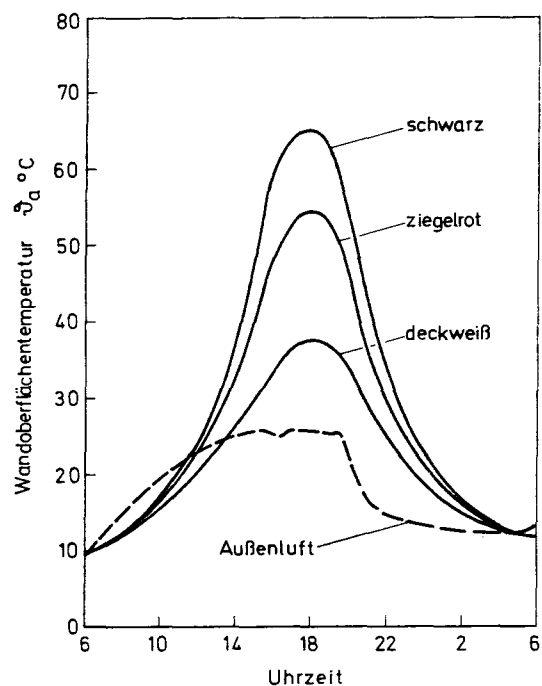


Bild 4.2.14 Wandoberflächentemperaturen von farbigen, geputzten Westwänden aus Bims-HBI-MW im Hochsommer

#### 4.2.6.4 Wärmestrahlungsaustausch zwischen Körpern

Beim Wärmeaustausch durch Strahlung zwischen Körpern wird Wärmeenergie vom wärmeren auf den kälteren übertragen. Stehen sich zwei ebenflächige Körper mit den absoluten Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  und den Strahlungszahlen  $C_1$  und  $C_2$  gegenüber, so beträgt die zum kälteren Körper übertragene Wärmestromdichte,  $T_1 > T_2$ :

$$q = C_{12} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (4.2.31)$$

wobei  $C_{12}$  die Strahlungsaustauschzahl ist:

$$C_{12} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s}} \quad (4.2.32)$$

Gleichung (4.2.31) kann auch in der Form der Stromdichte des Wärmeüberganges, s. Gleichung (4.2.2) geschrieben werden:

$$q = \alpha_{ST} (\vartheta_1 - \vartheta_2). \quad (4.2.33)$$

Hierin ist  $\alpha_{ST}$  die Wärmeübergangszahl der Strahlung, die mit dem Temperaturfaktor  $a$

$$\alpha_{ST} = a C_{12} \quad (4.2.34)$$

beträgt. Bei Raumtemperatur ist  $a \sim 1$ .

## 4.2.7 Wärmedehnverhalten

### 4.2.7.1 Baupraktische Bedeutung

Alle Bauteile erfahren Temperaturänderungen, die zu einer allseitigen Ausdehnung (bei Temperaturzunahme) oder Zusammenziehung (bei Temperaturabnahme) des Bauteils führen. Die Temperaturänderungen haben viele Ursachen. Sie entstehen, klimatisch bedingt, durch den täglichen und jahreszeitlichen Gang der Außenlufttemperatur (unter Einbeziehung der Besonnung). Wechsel im Heizbetrieb verändern die Raumtemperatur. Dabei erfahren die Bauteile nicht nur thermische Längs- oder Volumenverformungen. Da die Temperaturverteilung über den Querschnitt ungleichförmig verteilt ist, treten außerdem Verkrümmungen auf. Die bautechnische Bedeutung der Temperaturverformungen liegt in der Gefahr von Bauschäden. Diese droht dann, wenn ein Bauteil die Verformungen nicht frei, also zwanglos, ausführen kann. Jede Behinderung erzeugt einen Zwang, der bei behinderter Zusammenziehung Zug- und bei behinderter Ausdehnung Druckspannungen hervorruft. Behinderungen sind z. B. gegeben bei der festen Verbindung des Bauteils mit Nachbarbauteilen oder -stoffen verschiedener thermischer Verformung. Ein häufiger Fall ist die Stahlbetonplatte als Flachdach, wenn diese unverschieblich auf Mauerwerkswänden lagert. Die Temperaturverformung der Platte wird behindert; die Zwangsreaktionen erzeugen im MW Schubrisse in Eckbereichen. Es ist deshalb wichtig, durch konstruktive Maßnahmen (z. B. Fugen, Lager) bei der Herstellung und im fertigen Zustand die freien Verformungen zu ermöglichen [14].

### 4.2.7.2 Wärmeausdehnungszahl

Die thermische Längenveränderungsfähigkeit eines Baustoffes wird als eine Längsdehnung bezogen auf die verursachende Temperaturdifferenz  $\Delta\theta$  dargestellt. Die Stoffkonstante, die das thermische Dehnvermögen beschreibt, ist die lineare Wärmedehnzahl  $\alpha_t$ , auch als thermischer Längenausdehnungskoeffizient bezeichnet. Mit ihm errechnet sich die thermische Längenänderung eines Bauteils der Länge  $l_0$  zu:

$$\Delta l_t = l_0 \Delta\theta \alpha_t \quad (4.2.35)$$

$\alpha_t$  wird in  $10^{-6}/K$  oder  $10^{-6}/\text{grad}$  angegeben, da die Zahlenwerte i. d. R. klein sind (s. Tab. 4.2.7 und [N 11]). Die thermische Volumenänderungsfähigkeit wird als Volumendehnung bezogen auf die verursachende Temperaturdifferenz  $\Delta\theta$  dargestellt. Mit der volumetrischen Wärmedehnzahl  $\alpha_{vt}$  kann man die Vergrößerung  $\Delta V$  eines Ausgangsvolumens  $V_0$  bestimmen:

$$\Delta V_t = V_0 \cdot \Delta\theta \alpha_{vt} \quad (4.2.36)$$

In der Praxis interessiert i. d. R. nur das lineare thermische Dehnverhalten, gleichwohl ist zu merken, daß jede Temperaturdifferenz eine sich in jeder Richtung des Raumes einstellende lineare Dehnung verursacht. Deshalb ist bei isotropen Stoffen  $\alpha_{vt} = 3\alpha_t$ .

Tab. 4.2.7 Wärmedehnzahlen (gerundete mittlere Werte, verschiedene Quellen)

Stoff		lineare Wärmedehnzahl $\alpha_t$ $10^{-6}/K$
metallische Werkstoffe	Stahl	12
	Kupfer	12
	Messing	19
	Zink	33
	Aluminium	24
	Blei	30
anorg. mineralische Werkstoffe	Beton	9–12
	Gasbeton	6–8
	Bimsbeton	8–10
	Granit	5
	Sandstein	3
	Kalkstein	1,5
	Ziegel, Klinker, Fliesen	5–8
	Glas	8–9
Holz	Vollhölzer    zur Faser	3–10
	Vollhölzer   zur Faser	25–60
Kunststoffe	PVC – hart	70–80
	PVC – weich	125–180
	PP	160–180
	PE – H	115–185
	PE – N	200–230
	PMMA	70–80
	PIB	70–80
	PS	60–80
	PA	70–120

## 4.2.8 Normen, Richtlinien

- [N 1] DIN 1304: »Allgemeine Formelzeichen«, Ausg. 1978.
- [N 2] DIN 1341: »Wärmeübertragung; Grundbegriffe, Einheiten, Kerngrößen«, Ausg. 1971.
- [N 3] DIN 1345: »Technische Thermodynamik, Formelzeichen, Einheiten«, Ausg. 1969.
- [N 4] DIN 5031: »Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik«, Teil 1 bis 9.
- [N 5] DIN 5496: »Temperaturstrahlung«, Ausg. 1971.
- [N 6] DIN 4108: »Wärmeschutz im Hochbau«, Ausg. 1969.
- [N 7] Beiblatt zu DIN 4108: Ergänzende Bestimmungen, Ausg. 1975.
- [N 8] DIN 52611: »Bestimmung des Wärmedurchlaßwiderstandes von Wänden und Decken«, Bl. 1, Ausg. 1971.
- [N 9] DIN 52612: »Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät«, Bl. 1 bis 3, 1972 u. 73.

- [N 10] DIN 52614: »Bestimmung der Wärmeleitung von Fußböden«, Ausg. 1974.  
 [N 11] DIN 18530: »Massive Deckenkonstruktionen für Dächer«, Vornorm 1974.  
 [N 12] Bauphysik. Normen. DIN-Taschenbuch 189, 1982.

#### 4.2.9 Literatur

- [1] Gösele, K. u. Schüle, W.: Schall, Wärme, Feuchte. Bauverlag, Wiesbaden und Berlin, 7. Auflage, 1983.  
 [2] Schild, E., Casselmann, H., Dahmen, G. und Polenz, R.: Bauphysik-Planung und Anwendung. Vieweg Verlag, Braunschweig, 1978.  
 [3] Bobran, H. W.: Handbuch der Bauphysik. Vieweg Verlag Wiesbaden, 4. Auflage, 1979.  
 [4] Eichler, F.: Bauphysikalische Entwurfslehre. VEB-Verlag Technik, Berlin, 1968.  
 [5] Steinert, J.: Physik der Baukonstruktionen. Vorlesungs-Skriptum, TU Braunschweig, 1983.  
 [6] Gröber-Erk-Grigull: Grundgesetze der Wärmeübertragung. 3. verb. Nachdruck, Springer-Verlag, 1963.  
 [7] Kirsch, G. u. Zimmermann, G.: Baustofftechnische Eigenschaften – Kriterien zur Beurteilung von Baustoffen. Vorl. Skriptum, Univ. Stuttgart, 1983.  
 [8] Haferland, F.: Das wärmetechnische Verhalten mehrschichtiger Außenwände. Bauverlag, Wiesbaden, Berlin, 1970.  
 [9] Künzle, H. und Gertis, K.: Wärme- und feuchtigkeits-technische Untersuchungen an vorgefertigten Außenwänden. Betonsteinzeitung 32 (1966), S. 667–678.  
 [10] Gertis, K. und Hauser, G.: Instationärer Wärmeschutz. Berichte aus der Bauforschung. H. 103, 1975.  
 [11] Frank, W., Gertis, K., Künzle, H. und Snatzke, Chr.: Sonneneinstrahlung – Fenster, Raumklima. Berichte aus der Bauforschung, H. 66, 1970.  
 [12] Gertis, K.: Sommerlicher Wärmeschutz. VDI-Berichte 273, 1976.

### 4.3 Verhalten bei Befeuchtung und Trocknung

#### 4.3.1 Bautechnische Bedeutung

Die feuchtetechnischen Eigenschaften von Baustoffen, worunter das Verhalten unter der Einwirkung von Wasser und Wasserdampf im Hinblick auf das Eindringen in oder Austrocknen aus dem Stoff zu verstehen ist, besitzt eine große baupraktische Bedeutung. Diese Bedeutung erfaßt mehrere Gebiete.

Beim Feuchtigkeitschutz von umschließenden Bauteilen, ein Teilgebiet der Bauphysik, steht der Schutz von Nutzer und Bauwerk gegen schädliche Anreicherung oder schädliches Eindringen von Feuchte im Vordergrund. Beim Entwurf von Bauteilen und Bauwerken müssen außerdem die Ver-

formungen infolge Feuchteänderungen sorgfältig berücksichtigt werden, um Bauschäden zu vermeiden. Feuchtigkeits- und Wärmeschutz sind eng miteinander verkoppelt, da die Durchfeuchtung eines Baustoffes dessen Wärmedurchlaßwiderstand mindert. Schließlich wird die Dauerhaftigkeit von Baustoffen durch Feuchte in der Regel beeinträchtigt.

Der folgende Abschnitt ist den wesentlichen Eigenschaften der Baustoffe gewidmet, die Aufnahme und Abgabe von Feuchte bestimmen. Die aufgeführte Literatur [1 bis 14] stellt nur eine Auswahl dar, mit der vertiefte Kenntnisse erworben werden können. Dichtstoffe und Bauwerksabdichtungen werden hier nicht behandelt.

#### 4.3.2 Feuchtetechnische Größen und Einheiten

##### a. Druckeinheiten

Der Partialdampfdruck (Teildruck)  $p$  bzw. der Sättigungsdampfdruck  $p_s$  des Wasserdampfes wird in Pascal (Pa) angegeben:  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ . Außerdem ist die Angabe in Bar (bar) zulässig:  $1 \text{ bar} = 0,1 \text{ MPa}$ . Da in Veröffentlichungen auch noch andere Einheiten zu finden sind, werden ihre Umrechnungen angegeben:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Torr (1 mm Hg oder 1 mm QS)} \\ &\triangleq 1,333 \cdot 10^{-3} \text{ bar} \triangleq 1,360 \cdot 10^{-3} \text{ at} \triangleq 133,3 \text{ Pa} \\ 1 \text{ at} \\ &\triangleq 735,6 \text{ Torr} \quad \triangleq 0,981 \text{ bar} \quad \triangleq 9,81 \cdot 10^4 \text{ Pa} \end{aligned}$$

bzw.

$$1 \text{ at} \triangleq 10^4 \text{ kp/m}^2 \triangleq 1 \text{ kp/cm}^2 \triangleq 10^4 \text{ mm Wassersäule}$$

##### b. Feuchtetechnische Größen

s. Tab. 4.3.1. Das Wort Wasserdampfdiffusion wird mit WDD abgekürzt.

#### 4.3.3 Baustoff und Feuchtigkeit

Feuchtigkeit kann auf vielfältigste Weise in den Baustoff gelangen bzw. in ihm vorhanden sein. Die Anfangsfeuchtigkeit frisch geschlagenen Holzes ist sehr hoch. Zur Herstellung von Mörteln und Betonen ist die Zugabe von Wasser erforderlich, von dem ein Teil als verdampfbare Feuchte, also chemisch ungebunden im Baustoff vorliegt. Unter dem Einfluß der Witterung dringt bei fehlendem Schutz während der Lagerung, des Transports und der Bauzeit Wasser in die Stoffe ein. Aber auch das fertige Bauwerk ist der Feuchtigkeit ausgesetzt, und zwar sowohl durch die Witterung, als auch durch die Nutzung innerhalb des Bauwerkes.

Der Gehalt an verdampfbarer Feuchtigkeit – in einem bestimmten Zustand bzw. zu einem bestimmten Zeitpunkt – wird durch die massebezogene oder die volumenbezogene Feuchte angegeben. Die mittlere massebezogene Feuchte einer Baustoffprobe erhält man über das Feuchtgewicht (-masse) zum Zeitpunkt  $t$  und das Trockengewicht (nach

Tab. 4.3.1 Wesentliche feuchtetechnische Größen

Größe	Zeichen	SI-Einheit	bisher übliche Einheit	Faktor zur Umrechnung in SI-Einheit
Teildrucke	$p_i, p_s$	Pa, bar $1 \text{ Pa} \triangleq 1 \text{ N/m}^2$	Torr, mm QS mm WS	s. Abschn. 4.3.2; a)
rel. Luftfeuchte	$\varphi$	1	1	1
mittlere Stofffeuchte	$u_{gm}, u_{vm}$	1	1	1
Wasserdampfdiffusionsstrom = WDD-Strom	$I$	g/h	g/h	1
WDD-Stromdichte	$i$	g/m <sup>2</sup> h	g/m <sup>2</sup> h	1
WDD-Leitzahl	$\delta$	g/mhPa	g/mhTorr	$2,08 \cdot 10^{-9}$
WDD-Widerstandszahl	$\mu$	1	1	1
diffusionsäquivalente Luftschichtdicke	$s_d$	cm	cm	1
Wasseraufnahmekoeffizient	$A$	kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup>	kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup>	1
Wassereindringkoeffizient	$B$	m/s <sup>1/2</sup>	m/s <sup>1/2</sup>	1
Wasserdurchlässigkeitskoeffizient	$k$	cm/s	cm/s	1
Schwinddehnung od. Schwindmaß	$\varepsilon_{ls}; \varepsilon_{vs}$	% od. ‰	% od. ‰	1
Quelldehnung od. Quellmaß	$\varepsilon_{lq}; \varepsilon_{vq}$	% od. ‰	% od. ‰	1

vollständiger Austrocknung des verdampfbaren Wassers) zu:

$$u_{gm} = \frac{G(t) - G_{tr}}{G_{tr}} \cdot 100 \text{ [M.-%] oder [Gew.-%]} \quad (4.3.1)$$

Die volumenbezogene mittlere Feuchtigkeit ist:

$$u_{vm} = u_{gm} \cdot \frac{\rho}{\rho_w} \quad [\text{Vol.-%}] \quad (4.3.2)$$

Über den Querschnitt des Bauteils gesehen, können örtlich mehr oder minder große Unterschiede zur mittleren Feuchte vorhanden sein.

Da die Austrocknung und die Feuchteaufnahme eines Baustoffes bzw. eines Bauteils, ebenso wie die Wärmeleitung, Ausgleichsprozesse sind, durch die das Feuchtgleichgewicht mit der Umgebung angestrebt wird, spielen die Zeit, die Bauteilabmessungen und die Klimabedingungen etc. eine große Rolle.

Je nach dem Einsatz oder der Beanspruchung eines Baustoffes sind verschiedene charakteristische Feuchtezustände maßgebend. Hierzu einige Beispiele:

- Für den Nachweis des Feuchteschutzes von Bauteilen in der Bauphysik ist von der praktischen Feuchte auszugehen, die in 90% aller Fälle nicht überschritten wird und die mit den Rechenwerten der Wärmeleitzahlen nach DIN 4108 verknüpft ist.
- Eine gewisse kritische Feuchte darf bei Beton nicht überschritten werden, um nicht dessen Frostbeständigkeit zu gefährden.

Die folgenden Abschnitte werden die Vorgänge beim Feuchtetausch, die Auswirkung der Feuchte auf einige Baustoffeigenschaften u. a. m. beschrieben.

#### 4.3.4 Wasser, Wasserdampf und Eis

Wasser tritt auf der Erdoberfläche in den Aggregatzuständen flüssig, dampfförmig (Gasgemisch von Luft und Wassermolekülen) und fest (Eis) auf. Nahezu jeder Baustoff kommt mit Wasser gewollt oder ungewollt in Berührung; manche Baustoffe brauchen sogar Wasser zur Stoffbildung.

Das Wassermolekül entsteht aus zwei Wasserstoff- und einem Sauerstoffatom infolge der ungesättigten, äußeren Elektronenschale des Sauerstoffes (s. Bild 4.3.1). Damit ist es zwar insgesamt elektrisch neutral, besitzt jedoch eine ungleichmäßige Verteilung der elektrischen Ladung, eine Eigenschaft, die als Polarität bezeichnet wird. Im Bereich des Wasserstoffes ist die Ladung positiv, in dem des Sauerstoffes negativ. Die Polarität bestimmt das chemische und physikalische Verhalten von Wasser und die Wechselwir-

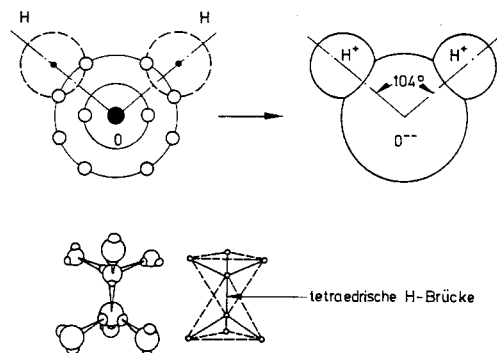


Bild 4.3.1 Wassermolekül und Wasserstoffbrückenbildung

kung zu anderen Stoffen (Benetzbarkeit, Adsorptionsfähigkeit u. a. m.).

Durch die Polarität lagern sich die Moleküle zu größeren Einheiten über die tetraedrische Wasserstoffbrückenbildung zusammen (s. Bild 4.3.1). Die Kristallstruktur des Eises baut sich aus aneinandergeketteten Tetraedern aus je vier Wassermolekülen auf. Mit Temperaturzunahme brechen die Bindungen zwischen den Tetraedern auf, bis in der Dampfform i. w. nur einzelne Wassermoleküle vorhanden sind. Wegen der Kleinheit des Wassermoleküls (äqu.  $d \sim 0,28 \cdot 10^{-9}$  m) vermag Wasser in die Makro- und Mikroporen poröser Baustoffe einzudringen und sich dort adsorptiv an Porenwänden anzulagern (physikalische Bindung durch elektrostatische Anziehungskräfte; Eigenschaft der Hygroskopizität).

Wenn Wassermoleküle aus dem festen oder aus dem flüssigen Zustand in den Gaszustand wechseln, entsteht Wasserdampf. Dabei kann die Luft beim Normaldruck von 760 Torr  $\triangleq$  1 atm nur eine bestimmte, von der Temperatur abhängige Größtmenge an Wasserdampf aufnehmen. Diese wird als Sättigungsdampfmenge  $m_s$  in  $\text{g/m}^3$  Luft bezeichnet; dabei übt der Wasserdampf im Luft-Wasserdampf-Gemisch den Sättigungsdampfdruck  $p_s$  aus. Die Bilder 4.3.2 und 4.3.3 zeigen die Abhängigkeit von  $p_s$  und  $m_s$  von der Temperatur der Luft. Mit Zunahme der Temperatur steigen der Sättigungsdampfdruck und die Sättigungsdampfmenge steil an (beachte die log. Teilung).

Ist in einem festen Luftvolumen die Dampfmenge  $m$  geringer als die Sättigungsdampfmenge  $m_s$ , so liegt ungesättigter Dampf vor, dessen relativer Feuchtegehalt wie folgt definiert ist:

$$\varphi = \frac{p}{p_s} \cdot 100 [\%]$$

oder mit dem zu  $m$  gehörigen Dampfteildruck ist

$$\varphi = \frac{m}{m_s} \cdot 100 [\%]$$

Die Größe  $\varphi$  wird als relative Luftfeuchte bezeichnet. Im Sättigungszustand ist  $\varphi = 100\%$ .

Wird feuchte Luft, die ein bestimmtes Volumen einnimmt und eine bestimmte Dampfmenge  $m$  enthält, erwärmt, so sinkt die rel. Luftfeuchte, weil der zugehörige Sättigungsdampfdruck ansteigt (s. Bild 4.3.1). Umgekehrt steigt die rel. Luftfeuchte bei Abkühlung an. Bei Erreichen einer bestimmten Temperatur, Taupunkt oder Taupunkttemperatur genannt, kann die vorhandene Wassermenge nicht mehr in Dampfform gehalten werden, und sie scheidet sich als Nebel aus oder schlägt sich als Tau nieder. Diese Kondensation oder Tauwasserbildung kann auf Oberflächen (Oberflächenkondensat, Beispiel: Tröpfchenbildung auf Glasscheiben an der Rauminnenseite) oder im Inneren von Bauteilen stattfinden (Kernkondensat infolge aus dem Rauminnen ins Bauteil eindiffundierten Wasserdampfes) beobachtet werden.

Durch die Feuchtigkeit innerhalb des Gefüges eines porösen Werkstoffes können, jedoch müssen nicht, die Gebrauchseigenschaften verändert werden. Inwieweit dies geschieht, hängt neben dem Feuchtegehalt v. a. von der Baustoffart und den äußeren Beanspruchungen ab. Von besonderem Einfluß auf die Dauerhaftigkeit von Putzen, Mörteln, Betonen u. ä. ist das Gefrieren von Wasser in den

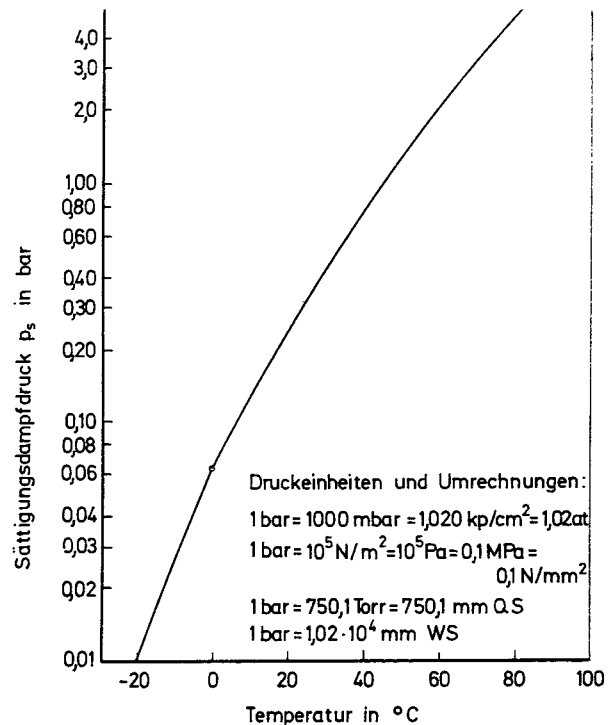


Bild 4.3.2 Sättigungsdampfdruck in Abhängigkeit von der Lufttemperatur

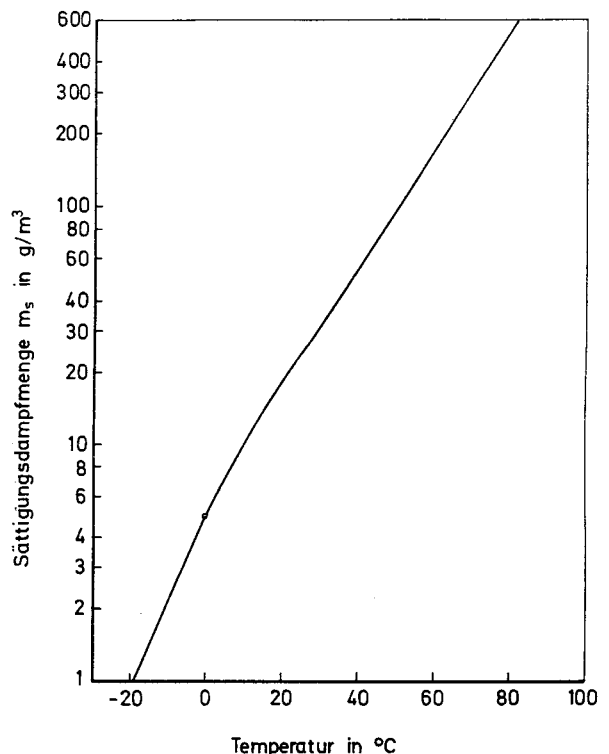


Bild 4.3.3 Sättigungsdampfmenge in Abhängigkeit von der Lufttemperatur

Poren des Stoffes. Die Frostzerstörung beruht u. a. auf der Volumenvergrößerung von rd. 9 Vol-% beim Übergang vom flüssigen Wasser zu Eis und auf dem Entstehen eines sehr hohen Kristallisationsdruckes (bis 2100 bar), wenn die Volumenvergrößerung behindert wird. Näheres s. Abschn. Beton.

### 4.3.5 Arten des Transports von Feuchte in porösen Baustoffen

#### 4.3.5.1 Vorbemerkungen, Begriffe

Befindet sich ein Körper, der eine gewisse Menge Feuchtigkeit in sich gespeichert hat, in einer Umgebung – in Wasser oder an Luft bestimmter rel. Feuchte – so wird ein Feuchte-tausch mit der Umgebung einsetzen. Dieser Feuchte-tausch setzt allerdings nur dann ein, wenn zwischen dem Feuchte-zustand des Körpers und dem der Umgebung ein Unter-schied (Ungleichgewicht) besteht, den auszugleichen eben das Bestreben des Feuchte-tausches ist. Nach der Wir-kungsrichtung des Feuchtestromes unterscheidet man die Wasseraufnahme (Sorption) von der Wasserabgabe (Desorption). Dabei durchwandern die Wassermoleküle den Körper, ein Vorgang, der mit Permeation bezeichnet wird [3], [14].

Je nach dem Feuchtezustand, der Porenstruktur, der anstehenden Umgebungsfeuchte u. a. m. unterscheidet man fol-gende wesentliche Arten des Feuchtetransportes:

- a) Diffusion – Transport von Wasserdampf
- b) Kapillarleitung – Transport von flüssigem Wasser
- c) Sickerströmung – Transport von flüssigem Wasser

Das Wesen dieser Transportarten, ihre Bedeutung im Bau-wesen werden im folgenden besprochen. Dabei muß jedoch betont werden, daß sie i. d. R. vermischt, also gleich-zeitig auftreten.

#### 4.3.5.2 Wasserdampfdiffusion

##### a) Vorgang

Die Wasserdampfdiffusion, abgekürzt mit WDD, ist ähnlich wie der Temperatenausgleich infolge Wärmeleitung ein Aus-gleichsprozeß, der sowohl in der Luft als auch innerhalb poröser Körper stattfindet. Der Transportvorgang der Was-serdampfmoleküle wird durch ein Konzentrationsgefälle hervorgerufen, dem ein proportionales Dampfteildruckge-fälle entspricht (Begriffe nach [N 1]).

Bild 4.3.4 zeigt den Vorgang der WDD für zwei benachbarte Luft-Wasserdampfgemische unterschiedlichen Wasser-dampfteildrucks, also auch unterschiedlicher rel. Feuchte. Durch die Röhre hindurch findet die Stoffvermischung solange statt, bis die Dampfteildrucke zu beiden Seiten der dampfdichten Trennwand gleich sind. Die Diffusionsstrom-dichte des Wasserdampfes in Luft beträgt mit  $\Delta p = p_{Di} - p_{Da}$ :

$$i_L = \delta_L \frac{\Delta p}{d_L} \quad [\text{g/m}^2\text{h}] \quad (4.3.3)$$

$\delta_L$  ist hierin der Leitkoeffizient der WDD in Luft und  $\Delta p/d_L$  stellt das antreibende Druckgefälle dar. Der Wasserdampf diffun-dierte dabei vom Ort höheren zum Ort niedrigeren Dampfteil-druckes. Der Leitkoeffizient  $\delta_L$  der Luft ist vom Luftdruck und von der Temperatur abhängig. Für mittlere Verhältnisse ist:

$$\delta_L = \frac{10^3}{1,6} \quad [\text{g/mhNm}^{-2}] \quad (4.3.4)$$

Wäre die Röhre von einem porösen Baustoff erfüllt, so fände die Wasserdampfdiffusion ebenfalls statt; allerdings deutlich verlangsamt, da der Stoff einen gewissen Diffusionswider-stand leistet.

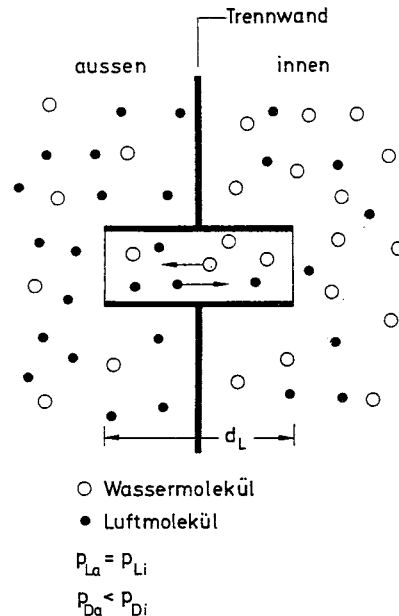


Bild 4.3.4 Vorgang der Wasserdampfdiffusion in Luft

##### b) Wasserdampfdiffusion durch Bauteile

Trennt ein einschaliges Bauteil zwei Räume voneinander, die unterschiedliche Temperaturen und folglich auch unter-schiedliche Dampfteildrucke aufweisen, so bewegt sich im Beharrungszustand der Wasserdampf mit folgender Strom-dichte durch das Bauteil (s. Bild 4.3.5), Einheit  $\text{g/m}^2\text{h}$  o. e.:

$$i = \delta \frac{\Delta p}{d} \quad (4.3.5)$$

Damit stellt der Materialkennwert  $\delta$ , als WDD-Leitzahl des Baustoffes bezeichnet, die zur Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  analoge Größe dar:  $\delta$  ist jene Wasserdampfmenge in g, die stündlich durch eine 1 m dicke Baustoffschicht diffundiert, wenn über diese hinweg ein Dampfteildruckunterschied von z. B. 1 mbar herrscht. Als WDD-Durchlaßzahl ist definiert:

$$\Delta = \frac{\delta}{d} \quad (4.3.6)$$

bzw. deren Kehrwert wird als WDD-Durchlaßwiderstand be-zeichnet:

$$\frac{1}{\Delta} = \frac{d}{\delta} \quad (4.3.7)$$

Analog zum Wärmedurchgang erhält man die WDD-Durch-gangszahl:

$$k_D = \frac{1}{\frac{1}{\beta_1} + \frac{d}{\delta} + \frac{1}{\beta_2}} \quad (4.3.8)$$

Ihr Kehrwert ist der WDD-Durchgangswiderstand. Die Grö-ßen  $\beta_1$  und  $\beta_2$  sind die Übergangswiderstände an den Bauteil-oberflächen. Sie hängen, ebenso wie die Wärmeüber-gangszahlen  $\alpha_i$ ,  $\alpha_a$ , von der Luftgeschwindigkeit ab. Die

Kehrwerte  $1/\beta$  können i. d. R. gegenüber  $d/\delta$  vernachlässigt werden, so daß

$$k_D \approx \Delta = \frac{\delta}{d} \quad (4.3.9)$$

In Bild 4.3.5 ist außerdem der Verlauf des Sättigungsdampfdruckes, der von der Temperatur  $\vartheta$  abhängt, eingetragen. Er liegt im gezeigten Beispiel über der Linie des Teildruckes. Damit findet an keiner Stelle innerhalb der Wand eine Kondensation statt.

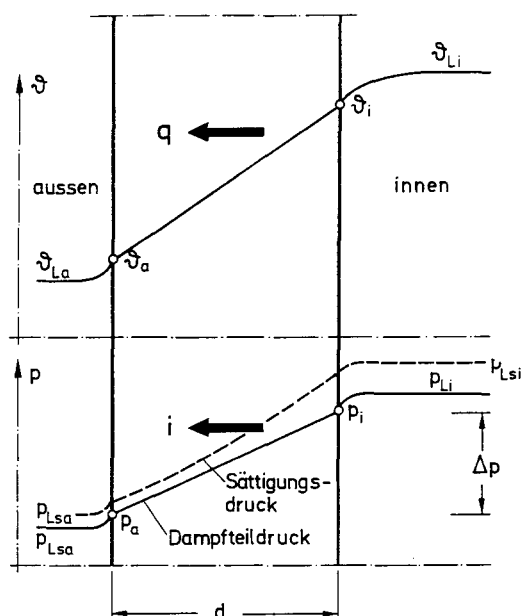


Bild 4.3.5 Temperatur- und Dampfdruckverlauf in einem einschichtigen Bauteil

Zur Kennzeichnung des Diffusionsverhaltens eines Stoffes dient die Diffusionswiderstandszahl  $\mu$ , die das Verhältnis der Diffusionsstromdichte in der Luft zu der im Baustoff angibt. Dabei sind gleiche Schichtdicken  $d = d_L$  und die gleiche Druckdifferenz  $\Delta p$  vorausgesetzt. Mit den Gl. (4.3.3) und (4.3.5) erhält man:

$$\mu = \frac{i_L}{i} = \frac{\delta_L}{\delta} \geq 1 \quad (4.3.10)$$

Die Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  gibt an, um wieviel mal mehr Wasserdampf je m Dicke pro Stunde und pro 1 mbar Druckdifferenz durch Luft im Vergleich zum Baustoff hindurchwandert. Die Diffusionswiderstandszahl ist eine Baustoffkenngröße, die i. w. von der Struktur, Porosität und von der Feuchtigkeit des Stoffes abhängt (s. Tab. 4.3.2).

Zur Beschreibung des Diffusionswiderstandes einer Baustoffschicht der Dicke  $d$  im Vergleich zu Luft dient die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_d$ , die denselben Diffusionswiderstand aufweist wie die Stoffschicht  $d$  mit der Diffusionswiderstandszahl  $\mu$ :

$$s_d = d \cdot \mu \quad (4.3.11)$$

Mit der äqu. Luftschichtdicke kann man nun die Diffusionswiderstände verschiedener Baustoffe und deren Schichtdicken miteinander vergleichen. Setzt man die Gl. (4.3.11)

in (4.3.7) ein, so erhält man folgenden Ausdruck für den WDD-Durchlaßwiderstand:

$$\frac{1}{\Delta} = \mu_d \cdot \frac{1}{\delta_L} = s_d \cdot \frac{1}{\delta_L} \quad (4.3.12)$$

Die WDD-Leitzahl  $\delta_L$  in Luft hängt vom Luftdruck und der Temperatur ab. Für 23 °C und mittlere Luftdruckverhältnisse ist dann

$$\frac{1}{\Delta} = 16 \mu_d \quad [\text{m}^2 \text{h mbar/g}] \quad (4.3.13)$$

Damit kann man die Wasserdampfdiffusionswiderstände von Baustoffen sofort vergleichen, wobei der Faktor 16 außer acht gelassen werden kann. Hierzu ein Beispiel:

PVC-Folie 0,1 mm dick  $\mu_d = 50000 \cdot 0,0001 = 5 \text{ m}$   
 Sperrholz 10 mm dick  $\mu_d = 200 \cdot 0,01 = 2 \text{ m}$

Die Folie bietet also den größeren WDD-Widerstand als das Sperrholz.

Die Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  ist eine Baustoffkenngröße. Tab. 4.3.2 enthält Zahlenwerte für einige wichtige Baustoffe, die als mittlere Richtwerte anzusehen sind. Der WDD-Widerstand einer Baustoffschicht wird durch das Produkt  $\mu d$  beschrieben.

Die dargestellten Beziehungen werden grundsätzlich auch bei den in der Praxis meist mehrschichtigen Bauteilen bei feuchtetechnischen Nachweisen angewandt. Diese Nachweise dienen der Überprüfung der Gefahr der Kondensation, der Berechnung der ausfallenden Kondensatmenge in der kalten Jahreszeit u. a. m.

#### c) Bestimmung und Einflußgrößen der WDD-Widerstandszahl $\mu$

Die Bestimmung von  $\mu$  von Bau- und Dämmstoffen erfolgt nach [N2]. Dabei wird, wie in Bild 4.3.6 gezeigt ist, ein plattenförmiger Probekörper der Dicke  $d$  bei konstanter Temperatur einem definierten Dampfdruckgefälle unterworfen. Im ursprünglich trockenen Probekörper setzt eine Feuchtwanderung, also ein gerichteter Feuchtestrom, ein. Die Feuchteaufnahme wird durch Wägung bestimmt und erlaubt die Errechnung der Leitzahl  $\delta$  bzw. der Widerstandszahl  $\mu$ . Der WDD-Widerstand von Beschichtungen o. ä. wird vergleichend festgestellt, indem das Verhalten von beschichteten und unbeschichteten Schichten gemessen und einander gegenübergestellt wird.

Die WDD-Widerstandszahl poröser Stoffe ist, wie in der unteren Bildhälfte gezeigt wird, vom Feuchtezustand des Baustoffes bzw. von den anstehenden Luftfeuchten abhängig. Man untersucht deshalb das Diffusionsverhalten in zwei Bereichen: der rel. Luftfeuchte im Trockenbereich 0/50% r. L. und im Feuchtbereich 50/100% r. L. Während im Trockenbereich die Feuchtwanderung vornehmlich in Dampfform als WDD erfolgt, überlagert sich dieser mit zunehmender Feuchte auch ein Wassertransport in flüssiger Form infolge kapillarer Leitung (s. Abschn. 4.3.5.3). Damit steigt bei zunehmender Stofffeuchte die Leitzahl  $\delta$  an, während die Widerstandszahl  $\mu$  und damit der WDD-Widerstand wegen Gl. (4.3.10) abnehmen muß. Bild 4.3.7 gibt diese Zusammenhänge für einige Baustoffe wieder. Eine Temperaturzunahme bewirkt ebenfalls eine Steigerung der Wasserdampfdurchlässigkeit.

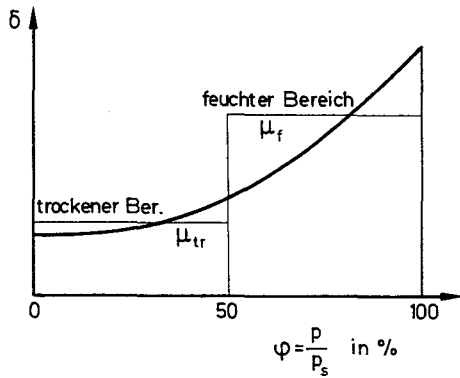
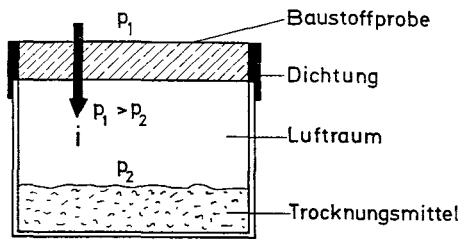


Bild 4.3.6 Bestimmung der Leitzahl und deren Abhängigkeit von der Feuchtigkeit eines hygroskopischen Baustoffes

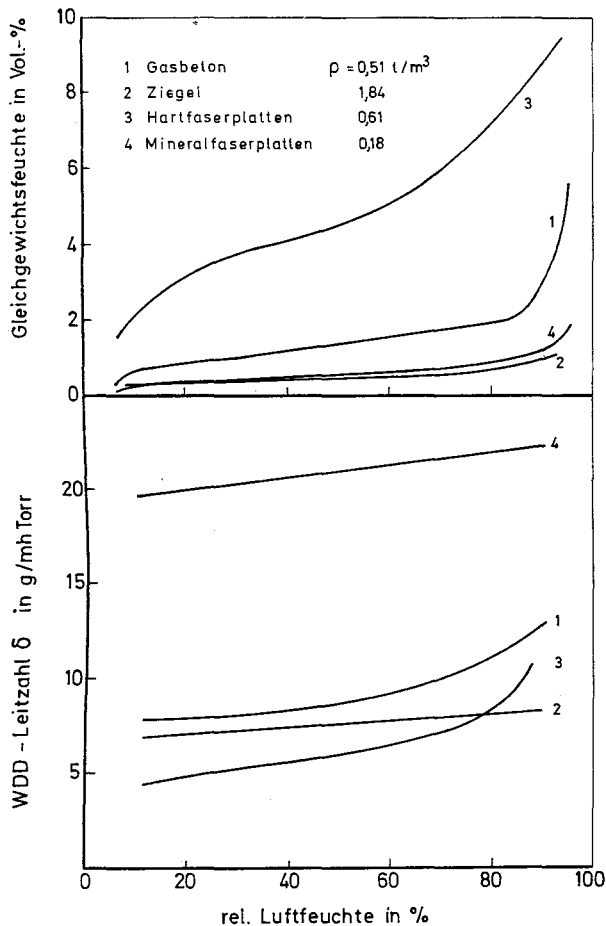


Bild 4.3.7 Abhängigkeit der WDD verschiedener Baustoffe von der rel. Luft- und der Gleichgewichtsfeuchte des Stoffes

Die Wasserdampfdurchlässigkeit wird von der Porosität, der Art, Größe und Verteilung der Poren im Baustoff nachhaltig beeinflusst. Beschreibt man die Porosität vereinfachend über die Rohdichte, so erkennt man aus den Bildern 4.3.8 und 4.3.9, daß mit zunehmender Rohdichte und damit abnehmender Porosität die Widerstandszahl zunimmt. Der Baustoff wird dampfdichter.

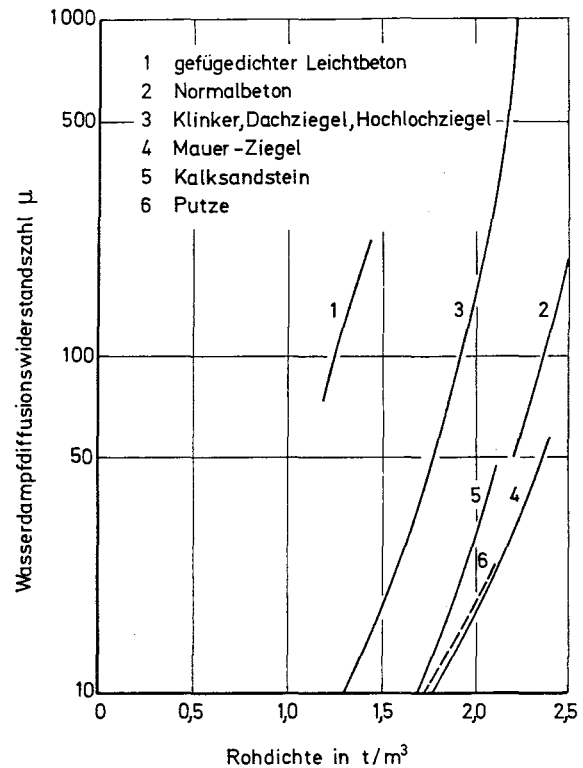


Bild 4.3.8 Mittlere WDD-Widerstandszahlen von Betonen, Ziegeln u.a. abhängig von der Rohdichte

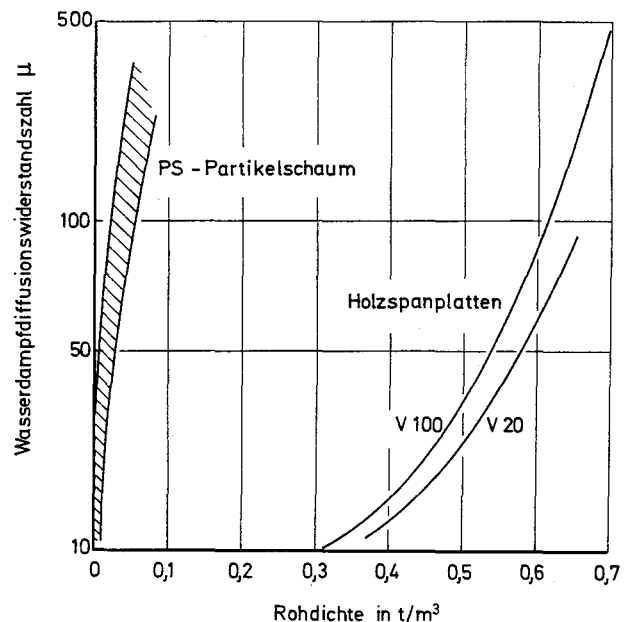


Bild 4.3.9 Mittlere WDD-Widerstandszahlen einiger organischer Baustoffe abhängig von der Rohdichte



Tab. 4.3.2 Zahlenwerte der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (Richtwerte, aus verschiedenen Quellen)

Stoff		Rohdichte $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	WDD-Widerstandszahl $\mu$ —
Mörtel und Betone	Kalk- und Kalkzementmörtel	1800	15–35
	Zementmörtel	2000	15–35
	Normalbeton B 15 bis B 35	2400	120
	Normalbeton B 45 bis B 55	2400	150
	Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge aus Blähton oder Blähschiefer	1200	80–180
	ohne Quarzsandzusatz	1300	80–180
	Asbestzementplatten	1400	80–180
Mauerwerk	Vollklinker	2000	100
	Vollziegel, Vormauerziegel	i.M. 1400	10
	Kalksand-Voll- und Lochstein	i.M. 1600	15–30
Dämmstoffe	Mineral- u. pflanzl. Dämmstoffe	—	1
	PS-Partikelschaum	15–30	20–70
	PS-Extruderschaum	—	80–300
	PU-Hartschaum, geschlossenzellig	30	30–100
	Schaumglas	140	dampfdicht
Holz und -werkstoffe	Fichte, Kiefer, Tanne	600	50
	Sperrholz	600	50–200
	Holzspanplatten	700	50–100
	Holzfasernplatten, hart	800	70
	Holzwoleleichtbauplatten	500	5
Bahnen, Folien, Anstriche	Dachpappe DIN 52 128, 2 mm dick	—	50000
	PVC-Folie	—	50000
	PE-Folie	—	100000
	PVC-Lacke 0,1 mm dick	—	(25 ÷ 50) 10 <sup>3</sup>
	PU-Lacke 0,1 mm dick	—	15000
	Dispersionsfarben 0,1 mm dick	—	200–6000
	Mineralfarben 0,1 mm dick	—	200
	Silikonimprägnierungen o. a.	—	50–100

#### 4.3.5.3 Kapillare Leitung von Wasser

##### a) Kapillare Wasseraufnahme

Unter kapillarer Wasseraufnahme eines porösen Stoffes ist das Einsaugen von Wasser in dessen Kapillarporen zu verstehen, wenn der Stoff an der Körperoberfläche von Wasser berührt wird (Beispiel: Wasserfilm auf einer Fassade infolge Schlagregens).

Die kapillare Wasseraufnahme kann auch entgegen der Wirkung der Schwerkraft des Wassers erfolgen (Beispiel: aufsteigende Mauerfeuchte) und wird von inneren Kräften, den Kapillarzugkräften, erzeugt. Wird – wie Bild 4.3.10 zeigt – ein Körper, der eine einzige Kapillarpore zylindrischer Gestalt aufweisen möge, in Wasser getaucht, so stellt sich in der Pore die kapillare Steighöhe  $H_k$  ein. Der Wasserfaden steht, da er hochgehoben wurde, unter einer Zugspannung,

Kapillarspannung genannt, die der Gewichtskraft des Wassers entsprechen muß:

$$P_k = \rho_w \cdot H_k \quad (4.3.14)$$

Die Oberfläche des Wasserfadens nimmt dabei die Form einer Kugelkalotte an, die Meniskus genannt wird. Aus Gleichgewichtsgründen muß das Gewicht des Wasserfadens entlang der Berührungslinie von Meniskus und Kapillare aufgehängt sein. Die Umfangskraft je Längeneinheit, die dies bewerkstelligt, ist die Oberflächenspannung des Wassers  $\sigma_w$ . Sie schließt mit der Kapillarenwand den Benetzungswinkel  $\vartheta$  ein und wirkt auch an jeder Stelle in der Oberfläche, die man sich als eine gespannte Membrane vorzustellen hat.

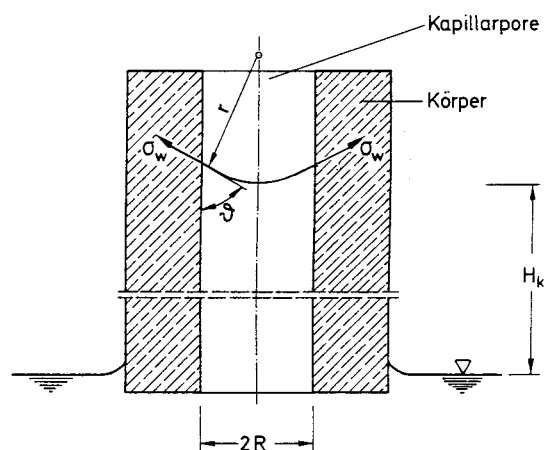


Bild 4.3.10 Zusammenhänge der Kapillarität in engen Poren eines Baustoffes

Zwischen dem Krümmungsradius des Meniskus  $r$  und dem Radius der Kapillarpore  $R$  gilt der geometrische Zusammenhang

$$R = r \cos \vartheta, \quad (4.3.15)$$

so daß die Kapillarspannung wie folgt ausgedrückt werden kann:

$$P_k = \frac{2 \sigma_w \cos \vartheta}{R} \quad (4.3.16)$$

Mit den Gln. (15) und (16) beträgt dann die kapillare Steighöhe:

$$H_k = \frac{2 \sigma_w \cos \vartheta}{R \rho_w} \quad (4.3.17)$$

Die kapillare Steighöhe ist umso größer, je kleiner der Porenradius  $R$ , also je feinporöser ein Stoff ist. Die Benetzbarkeit eines Baustoffes mit Wasser wird durch den Benetzungswinkel  $\vartheta$  beschrieben, der sowohl von der Oberflächenspannung des Wassers als auch von der des Baustoffes abhängt. Man unterscheidet:

- Wasserbenetzbare Stoffe (Begriff: hydrophil), wie die mineralischen Baustoffe (Beton, Ziegel usw.). Bei ihnen ist  $0 \leq \vartheta \leq 90^\circ$ .
- Durch Wasser schlecht bis nicht benetzbare Stoffe (Begriff: hydrophob) wie einige Kunststoffe (z.B. Silikonharze). Bei ihnen ist  $\vartheta > 90^\circ$ .

Eine kapillare Wasseraufnahme kann nur in benetzbaren Stoffen stattfinden. Bild 4.3.11 zeigt die Benetzbarkeit von unterschiedlichen Baustoffen am Beispiel des Wassertropfens: Durch eine Imprägnierung, z.B. auf Silikonbasis, wurde ein ursprünglich hydrophiler Fassadenbaustoff, z. B. Putz, hydrophobiert.

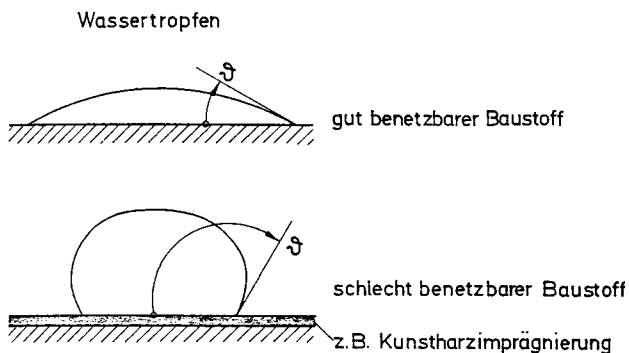


Bild 4.3.11 Benetzbarkeit von Baustoffen

Die kapillare Wasseraufnahme ist ein zeitabhängiger Prozeß. Dementsprechend stellt sich die Steighöhe nicht sofort, sondern erst nach geraumer Zeit ein. Versuche zeigen, daß die Wasserfront in einem Körper, der am unteren Ende in Wasser eintaucht (s. Bild 4.3.12) nach folgendem Gesetz hochwandert:

$$x[m] = B \sqrt{t} \quad (4.3.18)$$

Trägt man nach Bild 4.3.13 die Zeit  $t$  in Stunden im Wurzelmaßstab auf, so steigt die Wasserfront geradlinig bis zum Endwerk  $H_k$  auf. Da sich die Porenradien über einen breiten Bereich erstrecken, wird auch die Steighöhe, über dem Querschnitt des Körpers betrachtet, schwanken. Der Wassereindringkoeffizient  $B$  beschreibt die Sauggeschwindigkeit. Er ist ein Materialkennwert, der von der Porosität, von der Größe und der Häufigkeitsverteilung der Porenradien und anderem mehr abhängt (s. Tab. 4.3.3).

Auch die je Flächeneinheit des Körpers aufgenommene Wassermenge  $m_w$  folgt dem  $\sqrt{t}$ -Gesetz:

$$m_w[\text{kg Wasser/m}^2 \text{ Grundfläche}] = A \sqrt{t} \quad (4.3.19)$$

Der Wasseraufnahmekoeffizient  $A$ , ebenfalls ein Materialkennwert, beschreibt die Wasseraufnahmegeschwindigkeit. Wie Bild 4.3.13 zeigt, verläuft die Wasseraufnahme in zwei Abschnitten. Entsprechend gilt Glg. (4.3.19) nur während des ersten Abschnitts der Wasseraufnahme. Danach verläuft die Wasseraufnahme deutlich verlangsamt, aber auch etwa geradlinig. Nach Füllung der feinen Poren im ersten Abschnitt folgt die der Grobkapillaren im zweiten. Den Wasser- oder Feuchtigkeitsgehalt am Knickpunkt bezeichnet man – ausgedrückt in Vol.-% – mit Wasserkapazität  $\Psi_k$ . Der Sättigungswassergehalt  $\Psi_s$ , ebenfalls in Vol.-%, wird in der Regel erst nach langer Zeit erreicht; er entspricht ungefähr dem Volumen aller offenen Poren. Für die Wasserbelastung von Fassadenbaustoffen durch Regen ist die Wasserkapazität bedeutungsvoller als die Sättigungsfuchte.

Die Materialkennwerte der kapillaren Wasseraufnahme  $A$ ,  $B$ ,  $\Psi_s$  werden im Saugversuch am ursprünglich trockenen Baustoff bestimmt; Tab. 4.3.3 enthält Zahlenwerte für einige

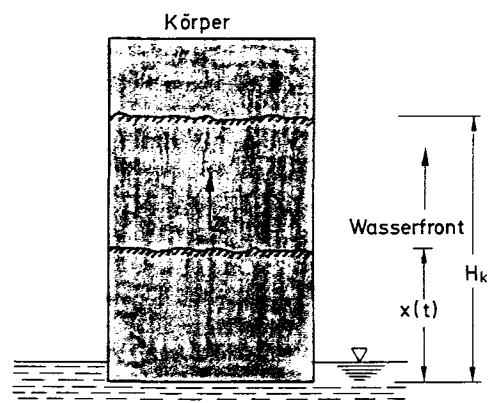


Bild 4.3.12 Kapillare Steighöhe in einem eintauchenden, porösen Körper

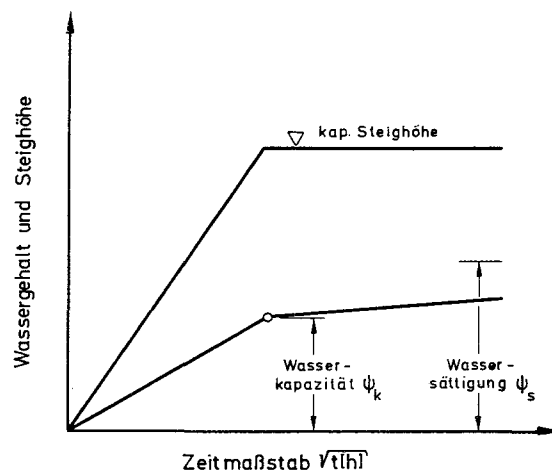


Bild 4.3.13 Abhängigkeit der kapillaren Wassermenge und Steighöhe von der Zeit

gebräuchliche Baustoffe. Der Wasseraufnahmekoeffizient  $A$  hängt von der Art und dem Gefüge des Baustoffs, dessen Porosität und Rohdichte sowie von dessen Ausgangsfuchte ab. Je höher die Ausgangsfuchte ist, umso langsamer verläuft die kapillare Wasseraufnahme.

Die Materialkennwerte der Wasseraufnahme sind bei mineralischen Baustoffen in der Regel umso kleiner, je größer die Rohdichte ist, die ja ein Maß für die Porosität darstellt. Bei Kunststoffbeschichtungen liegt keine kapillare Wasseraufnahme im strengen Sinne vor: Die Wassermoleküle drängen sich zwischen die Molekülketten: Prozeß der mizellaren Quellung, die Wasseraufnahme ist gering.

#### 4.3.5.4 Leitung von Wasser durch Sickerströmung

Wasser kann in porösen Körpern in flüssiger Form neben der kapillaren Leitung auch durch Sickerströmung gefördert werden. Der Antrieb erfolgt durch eine Wasserdruckdifferenz  $\Delta p$  über die Baustoffschicht der Dicke  $d$ , und man kann die Stromdichte wieder in der Form

$$i = k \frac{\Delta p}{d} \quad (4.3.20)$$

schreiben.  $k$  ist der Durchlässigkeitskoeffizient, der im wesentlichen von der Porigkeit des Stoffes abhängt. Eine

Tab. 4.3.3 Kennwerte der kapillaren Wasseraufnahme (Mittlere Werte aus verschiedenen Quellen)

Baustoff		Rohdichte $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	Wasseraufnah- mekoeffizient A kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup>	Wassereindring- koeffizient B m/s <sup>1/2</sup> · 10 <sup>-3</sup>	Wasserkapazität $\Psi_k$ Vol.-%	Sättigungs- wassergehalt $\Psi_s$ Vol.-%
Vollziegel	A	1750	25,1	2,24	19	29
	B	2175	2,9	0,56	9	13
Hochlochziegel	C	1155	8,3	0,73	19	22
	D	1165	8,9	0,81	18	18
Kalksandstein	A	1635	7,7	0,46	27	36
	B	1755	3,0	0,21	24	34
	C	1760	5,5	0,42	22	35
	D	1795	5,4	0,39	22	32
	E	1880	3,2	0,29	18	27
	F	1920	3,2	0,26	20	27
Normalbeton	A	2290	1,8	0,22	14	—
	B	2410	1,1	0,09	19	22
Bimsbeton	A	845	2,9	—	—	—
	B	1085	1,9	—	—	—
Gasbeton	A	530	4,0	0,23	0,29	74
	B	600	4,2	0,25	0,28	71
	C	620	6,5	0,38	0,29	72
	D	630	4,6	0,28	0,28	72
	E	640	7,7	0,45	0,28	60
Gipsbauplatte	A	600	38	1,80	0,36	—
	B	900	69	2,36	0,49	—
Weißkalkputz		—	7,0	—	—	—
Kalkzementputz	A	—	2,0	—	—	—
	B	—	4,0	—	—	—
Zementputz	A	—	2,0	—	—	—
	B	—	3,0	—	—	—
Kunststoffdispersions- beschichtung	A	—	0,05	—	—	—
	B	—	0,20	—	—	—

Sickerströmung kann nur im vollständig wassergesättigten Körper stattfinden, der überdies hauptsächlich grobporig sein muß. Damit tritt die Wirkung von Oberflächenkräften in den Hintergrund. Aus diesen Gründen spielt die Sickerströmung bei den üblichen Baustoffen eine untergeordnete Rolle; sie ist jedoch in rolligen Böden (Sand, Kies) die vorherrschende Transportart.

#### 4.3.5.5 Austrocknung kapillarporöser Stoffe

Ebenso wie die Feuchteaufnahme eines Stoffes durch Wasserdampfdiffusion oder kapillare Leitung interessiert die Abgabe von Feuchte durch Austrocknung, da in der Regel Perioden der Befeuchtung mit solchen der Trocknung abwechseln.

Zur Schilderung des Trocknungsvorganges, der der Befeuchtung entsprechende Ausgleichsprozeß umgekehr-

ter Stromrichtung, betrachten wir eine Stoffprobe (Wandausschnitt der Dicke  $d$ ), die nach langer Wasserlagerung die Sättigungsfeuchte  $u_s$  erreicht hat und die nun an Luft [ $\vartheta_L, \varphi < 100\%$ ] gelagert wird. Bild 4.3.14 zeigt, daß bei der beidseitigen Austrocknung die Feuchtigkeitsverteilung über den Querschnitt ungleichförmig verteilt ist. Die Randzonen trocknen rascher aus als der Kern. Die mittlere Feuchte  $u_m$  sinkt mit der Zeit ab und nähert sich der Ausgleichsfeuchte  $u_A$ , die eine Funktion der Temperatur und der rel. Feuchte der Luft ist: Je höher die Temperatur und je niedriger die rel. Feuchte sind, umso kleiner ist  $u_A$ . An der Wandoberfläche entlang streichender Wind beschleunigt die Trocknung. Diese Zusammenhänge gelten auch für den Fall, daß die Stoffprobe eine geringere Anfangsfeuchte  $u_0 < u_s$  hatte. Ist bei ihr  $u_0 > u_A$ , so trocknet sie; ist  $u_0 = u_A$ , so findet kein Feuchtaustausch statt, und ist  $u_0 < u_A$ , so nimmt sie Feuchte auf. Also stellt die Feuchtedifferenz  $u_0 - u_A (\vartheta_L; \varphi) = \Delta u$  den maßgebenden Antrieb dar und zeichnet die Stromrichtung vor.

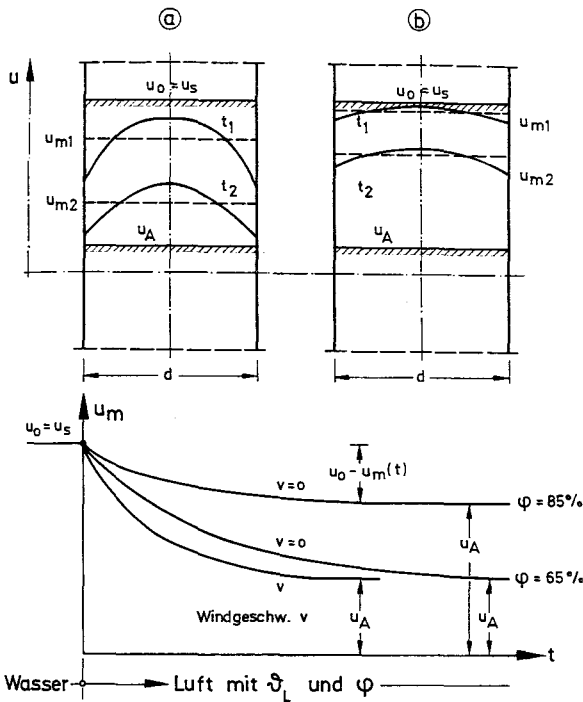


Bild 4.3.14 Zeitlicher Verlauf der Trocknung kapillarporöser Stoffe

Unter vorgegebenen Trocknungsbedingungen ist der Feuchteverlust von der Porenstruktur des Baustoffs abhängig. Ein überwiegend grobporiger Baustoff  $\bigcirc$  – geringe Kapillarleitfähigkeit – wird u.a. im Randbereich stärker und rascher trocknen als ein feinporöser Baustoff  $\bigcirc$  – große Kapillarleitfähigkeit.

Der Feuchteverlust ist zeit- und abmessungsabhängig. Je dicker die Stoffschicht ist, umso kleiner ist  $(u_o - u_m)$  innerhalb der Zeitspanne  $t$ . Maßgebend ist das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen des Bauteils, das bei beidseitiger Trocknung

$$\frac{O}{V} = \frac{2 \cdot 1 \text{ m}^2}{d \cdot 1 \text{ m}^3} = \frac{2}{d}$$

beträgt. Damit ist nach Rechnung und Beobachtung:

$$u_o - u_m(t) \approx \left( \frac{O}{V} \right)^2 t = \frac{4}{d^2} t$$

Die Austrocknung eines kapillarporösen Stoffes wird von zwei Vorgängen bestimmt:

1. Feuchtigkeitsübergang auf der Bauteiloberfläche
2. Feuchtetransport aus dem Innern.

Ausgehend vom wassersatten Körper beobachtet man zwei Trocknungsabschnitte. Im ersten Trocknungsabschnitt (s. Bild 4.3.15) herrscht eine ungefähr konstante, zeitunabhängige Feuchtestromdichte, die der zeitlichen Veränderung des mittleren Feuchtegehalts  $\Delta u_m / \Delta t$  entspricht und die auch als Trocknungs- oder Verdunstungsgeschwindigkeit bezeichnet wird. Während des ersten Trocknungsabschnitts kann aus dem Innern genügend Feuchtigkeit von den feinen Kapillaren durch Kapillarleitung gesaugt werden, die an der Bauteiloberfläche verdunstet. Die Feuchteabgabe hängt im wesentlichen vom Feuchteübergang ab (Temperatur, Wind usw.). Es werden dabei die groben Kapillaren

durch den Kapillarzug in den feinen Poren entleert. Im zweiten Trocknungsabschnitt ist kein ausreichender Nachschub mehr möglich, der Verdunstungsspiegel weicht ins Innere zurück. Der Kapillarzug in den dünnen Kapillaren ist derart angewachsen, daß ein Abreißen des Wasserfadens eintritt. Da nun die Kapillarleitung mit zunehmender Trocknungsdauer an Leistung verliert, erfolgt die Trocknung mehr und mehr durch Dampfdiffusion und zwar deutlich verlangsamt:  $\Delta u_m / \Delta t \rightarrow 0$ . Zum Zeitpunkt  $t_A$  ist die Ausgleichsfeuchte erreicht, und die Trocknung ist zum Stillstand gekommen. Ebenso wie die Feuchteaufnahme ist die Feuchteabgabe durch Trocknung für den Feuchtehaushalt eines Bauteils von Bedeutung. Für feuchtechnische Nachweise ist von Interesse, wie rasch ein Fassadenbaustoff, z.B. Putz, die durch Schlagregen aufgenommene Feuchte wieder abgibt. Mangelnde Trocknung führt zu lang andauernder Erhöhung der Feuchtigkeit, verbunden mit der Gefahr von Bauschäden (z.B. Frostabsprengungen). Bezüglich der Feuchtedehnungen und deren Auswirkung s. Abschnitt 4.3.6.

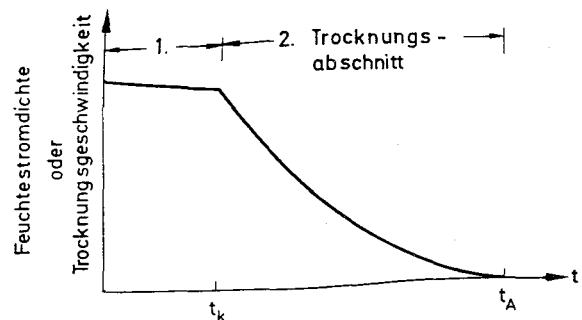
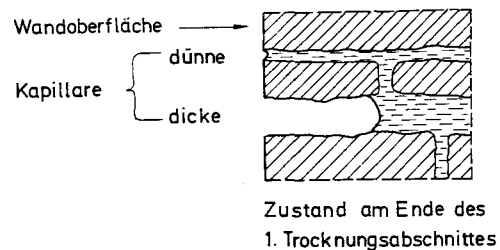


Bild 4.3.15 Zeitlicher Verlauf der Trocknungsgeschwindigkeit kapillarporöser Stoffe

#### 4.3.5.6 Gleichgewichtsfeuchte und Sorptionsfähigkeit

Lagert ein Bauteil aus einem hygroskopischen Stoff an Luft mit der Temperatur  $\vartheta_L$  und der rel. Feuchte  $\varphi$ , so wird sich in ihm nach entsprechender Zeit die Ausgleichs- oder Gleichgewichtsfeuchte  $u_A$  einstellen, die an jeder Stelle des Bauteils vorhanden ist und die von den Werten  $[\vartheta_L, \varphi]$  abhängt. Entsprechendes gilt für die Wasserlagerung, bei der sich die Sättigungsfeuchte  $u_s$  einstellt. Versuche zeigen, daß im Bereich der Gebrauchstemperaturen der Temperatureinfluß auf die Ausgleichsfeuchte gering ist.

Die Eigenschaft eines Baustoffs, Feuchtigkeit in seinem Innern (an Porenwänden bzw. im Porenraum) Wasser einzulagern, bezeichnet man als Sorptionsfähigkeit. Die Sorptionsfähigkeit ist damit von der offenen Porosität sowie von der Verteilung der Porengrößen abhängig. Trägt man die für einen Baustoff bei  $\vartheta_L = \text{const}$  gemessenen Ausgleichsfeuchten  $u_A$  über den jeweils zugehörigen rel. Luftfeuchten auf, so erhält man die Sorptionsisotherme. In Bild 4.3.16

sind diese Linien für drei Baustoffe dargestellt [3]. Hygroskopische Baustoffe, wie Zementmörtel und Gasbeton, lagern bis rd. 50% rel. Feuchte Wasser überwiegend physikalisch adsorptiv gebunden an die Porenwände und in sehr kleinen Poren. Mit steigender rel. Feuchte erfolgt die Füllung von Poren mit zunehmendem Radius durch Kapillarkondensation. Bei Wasserlagerung (100% rel. Feuchte) werden die Grobporen gefüllt, und es wird die Sättigungsfeuchte  $u_s$  erreicht. Die S-Form ist für hygroskopische Baustoffe typisch. Kunststoffe sind keine hygroskopischen Stoffe, sie lagern Wasser durch Quellung ein.

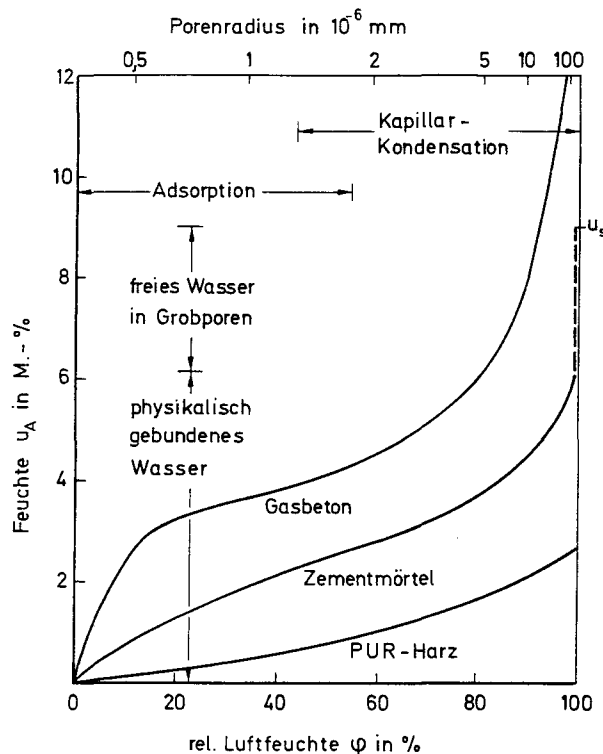


Bild 4.3.16 Sorptionsisothermen einiger Baustoffe, Art der Wasserbildung und Porenradien

Die Sorptionsfähigkeit eines Baustoffes ist von Einfluß auf die Behaglichkeit bewohnter Räume. Die Baustoffe von Innenräumen müssen bei plötzlichem Anstieg und Schwankungen der rel. Luftfeuchte Feuchte aufnehmen, speichern und später durch Trocknung wieder abgeben. Sie tragen so zur Regulierung des Raumklimas bei [9], [10]; Begriff: Hygrostabilität. Bild 4.3.17 zeigt die Sorptionsisothermen einiger Stoffe, aus denen man ablesen kann, daß die organischen Stoffe des Innenausbau (Holz, Wollstoff usw.) – gemessen an den anorganischen mineralischen Stoffen – erheblich mehr Feuchte speichern können.

### 4.3.6 Feuchtedehnungen

#### 4.3.6.1 Vorgang

Die Trocknung und Feuchteaufnahme von porösen Stoffen ist stets mit lastunabhängigen Feuchtedehnungen verbunden. Bei der Trocknung ziehen sich die Körper zusammen:

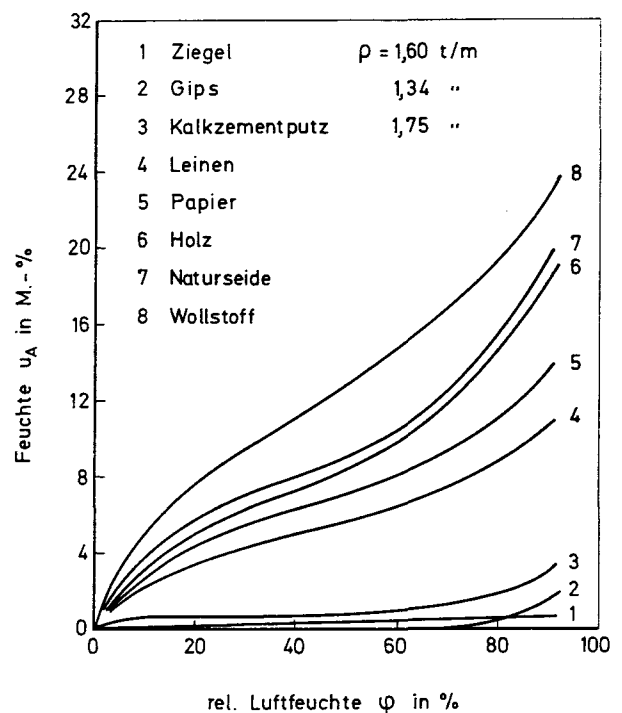


Bild 4.3.17 Sorptionsisothermen verschiedener Stoffe bei 20–25 °C

Schwinden (negative Dehnung); bei der Feuchteaufnahme dehnen sie sich aus: Quellen (positive Dehnung). Schwinden und Quellen hängen – hinsichtlich ihrer Größe – von der Menge verdampfbarer bzw. aufnehmbarer Feuchtedifferenz ab:  $u_m(0) - u_A(\vartheta_L, \varphi)$ . Man beschreibt die Verformungen infolge Schwinden und Quellen entweder als Längs- oder als Volumendehnung:

a) Längsdehnung infolge Schwindens »s« oder Quellens »q«:

$$\epsilon_{ls} = \frac{\Delta l_s}{l_0} \quad \text{bzw.} \quad \epsilon_{lq} = \frac{\Delta l_q}{l_0},$$

wobei  $\Delta l$  die Verformung und  $l_0$  die Bezugslänge ist, z. B. Bauteillänge.

$$\text{b) } \epsilon_{vs} = \frac{\Delta V_s}{V_0} \quad \text{bzw.} \quad \epsilon_{vq} = \frac{\Delta V_q}{V_0},$$

wobei  $\Delta V$  die Volumenänderung und  $V_0$  das Bezugsvolumen darstellt.

Bei Stoffen, die isotrop oder wenigstens quasi-isotrop sind, wie z. B. Beton, ist  $\epsilon_v = 3 \epsilon_l$ . Für Stoffe, die eine gerichtete Struktur besitzen, wie z. B. natürliches Holz, gilt dies nicht, da die Längsdehnungen in den drei Richtungen des Raumes unterschiedlich sind.

Die Ursachen des Schwindens und Quellens sind in der Wechselwirkung zwischen dem Feststoff und dem in den Poren eingelagerten Wasser zu suchen. Durch Trocknung oder Einlagerung von Wasser verändert sich die Oberflächenenergie und die Kapillarkugkraft.

Schwinden und Quellen sind zum mindesten teilweise umkehrbar. Sie entwickeln sich zeitlich entsprechend dem Ablauf ihrer Feuchteabgabe oder -aufnahme. Angaben zur Größe enthalten die Abschnitte über die Baustoffe.

#### 4.3.6.2 Praktische Bedeutung

Die Dehnungen infolge Schwinden und Quellen gewinnen erst dann eine Bedeutung, wenn sie große Werte annehmen und wenn sie daran gehindert werden, sich frei, also zwanglos, einzustellen. Dann bauen sich Zwang- und/oder Eigenspannungen auf, die zu Bauschäden führen (z. B. Estrichschwindrisse). Das Schwinden und Quellen von Baustoffen muß deshalb bei Entwurf und Konstruktion berücksichtigt werden.

#### 4.3.7 Normen, Richtlinien

- [N 1] DIN 5491: Stoffübertragung, 9.70.
- [N 2] DIN 52615: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen, Bl. 1; 6.73.
- [N 3] Bauphysik. Normen für das Studium. Wärmeschutz, Schallschutz, Feuchtigkeitsschutz, Brandschutz. DIN-Taschenbuch 189, 1982.

#### 4.3.8 Literatur

- [1] Schild, E., Casselmann, H.-F., Dahmen, G. und Pohlenz, R.: Bauphysik, Planung und Anwendung. Vieweg-Verlag, Braunschweig, 1977.
- [2] Haferland, F.: Das diffusionstechnische Verhalten mehrschichtiger Außenwände. Bauverlag, Wiesbaden-Berlin, 1967.
- [3] Gertis, K., Kiebl, K., Werner, H. und Wolfseher, U.: Hygrische Transportphänomene in Baustoffen. DAFStb-Heft Nr. 258, 1976.
- [4] Kirsch, G. und Zimmermann, G.: Baustofftechnische Eigenschaften – Kriterien zur Beurteilung von Baustoffen. Vorles. Skript, TU Stuttgart, 1983.
- [5] Schwarz, B. u. Frank, W.: Schlagregen, Meßmethoden Beanspruchung – Auswirkung. Berichte aus der Bau-forschung, H. 86, 1973.
- [6] Bauphysikalische Probleme und deren Lösungen. VDI-Berichte 273, 1976.
- [7] Steinert, J.: Physik der Baukonstruktionen. Vorlesungsskripten TU Braunschweig, 1983.
- [8] Seiffert, K.: Wasserdampfdiffusion im Bauwesen. Bauverlag, Wiesbaden-Berlin, 1967.
- [9] Künzle, H., Bernhardt, P., Cammerer, J. S. u. a.: Wasserdampfdiffusion in Baustoffen und Bauteilen. Berichte aus der Bauforschung, H. 80, 1973.
- [10] Caemmerer, W., Cammerer, J. S., Gertis, K., Künzle, H., Schwarz, B., Snatzke, Chr. und Jenisch, R.: Wasserdampfdurchlässigkeit und Feuchtigkeitsverteilung bei Baustoffen und Bauteilen. Berichte aus der Bauforschung, H. 51, 1968.
- [11] Gösele, K., u. Schüle, W.: Schall, Wärme und Feuchte. Bauverlag, Wiesbaden-Berlin, 7. Auflage 1983.
- [12] Bobran, H. W.: Handbuch der Bauphysik. Vieweg Verlag Wiesbaden, 4. Auflage 1979.
- [13] Eichler, F.: Bauphysikalische Entwurfslehre. VEB-Verlag Technik, Berlin, 1968.
- [14] Klopfer, H.: Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen. Bauverlag, 1974.

### 4.4 Lichttechnisches Verhalten

#### 4.4.1 Bautechnische Bedeutung

Ein auf ein Bauteil auftreffender Lichtstrom erfährt stets eine Beeinflussung. Ist das Bauteil lichtundurchlässig, so wird der Lichtstrom sowohl reflektiert als auch absorbiert. Bei einem lichtdurchlässigen Stoff wird der Lichtstrom zum Teil auch transmittiert. Diese Vorgänge üben auf die Beleuchtung in Innen- und Außenbereichen von Bauwerken, auf die Wiedergabe von Farben, auf die Bauteil- und Raumtemperatur (Sonnenschutz, sommerlicher Wärmeschutz) und somit auf das psychische und physische Wohlbefinden des Menschen einen nachhaltigen Einfluß aus. Die wesentlichen lichttechnischen Eigenschaften von Baustoffen werden im folgenden besprochen. Die Umsetzung der lichttechnischen Eigenschaften von insbesondere lichtdurchlässigen Baustoffen zur Dimensionierung der Tages- und Kunstlichtbeleuchtung von Räumen erfolgt durch die Methoden der Baukonstruktionslehre und der Bauphysik.

#### 4.4.2 Optische und sichtbare Strahlung

Licht ist eine Form von elektromagnetischer Strahlungsenergie, die sich ausgehend von einer natürlichen oder künstlichen Lichtquelle als transversale Wellen (Schwingungsrichtung quer zur Fortpflanzungsrichtung) ausbreitet. Der Wellenlängenbereich der elektromagnetischen Strahlung erstreckt sich zwischen dem der kosmischen Strahlung mit  $\lambda = 10^{-13}$  m und dem langer Radiowellen mit  $\lambda = 10^6$  m. Die von der Sonne ausgesandte »optische« Strahlung umfaßt das im Bild 4.4.1 gezeigte Spektrum der Wellenlängen. Rd. 3% der die Erde erreichenden Sonnenstrahlung liegt im Ultraviolett-Bereich (UV); 44% entfallen auf den sichtbaren Bereich und 53% auf den Infrarotbereich (IR). Den sichtbaren Bereich der optischen Strahlung bezeichnet man als Licht.

Das Spektrum des Sonnenlichts weist eine relativ gleichmäßige Verteilung der Wellenlängenbereiche der einzelnen Spektralfarben auf. Sonnenlicht wird als »weiß« empfunden.

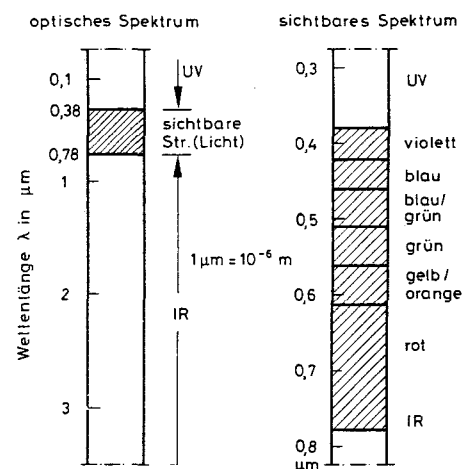


Bild 4.4.1 Optischer und sichtbarer Bereich der elektromagnetischen Strahlung

den. Daher erscheinen die Gegenstände bei Tageslicht in ihren natürlichen Farben. Im Gegensatz dazu weist die spektrale Energieverteilung des Glühlampenlichts eine Zunahme vom kurzwelligen zum langwelligen Bereich auf, wie Bild 4.4.2 zeigt. Hieraus resultiert eine Farbverzerrung, die rote Farben (langwellig) besonders leuchtend und blaue Farben (kurzwellig) matt und fahl wirken läßt. Farbmessungen bedürfen daher einer definierten Lichtart (Normlichtart A nach [N 3]).

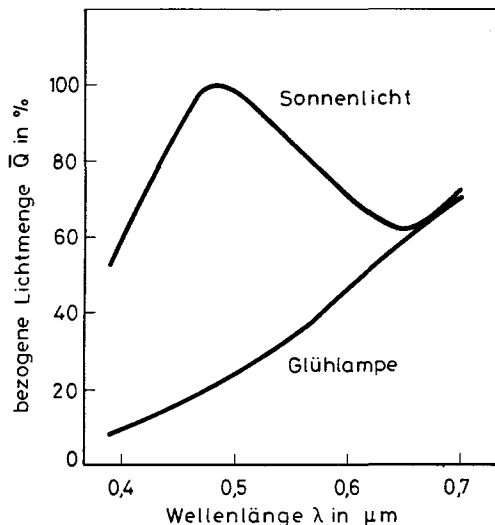


Bild 4.4.2 Spektrale Energieverteilung des Lichts in Abhängigkeit von der Wellenlänge und der Lichtart

Die energiegleiche Strahlung verschiedener Wellenlängen ruft verschieden starke Lichtwirkungen auf das menschliche Auge hervor, welches das Licht der Wellenlänge von gelb als besonders leuchtend empfindet. Dieses Helligkeitsempfinden verschiedener Farben findet Berücksichtigung in der Definition der »spektralen Hellempfindlichkeit  $V(\lambda)$ «, nach der die Festlegung der lichttechnischen Grundgrößen erfolgt [N 1].

Bild 4.4.3 zeigt die Abhängigkeit der Sonneneinstrahlungsintensität an der Erdatmosphäre von der Wellenlänge [4]. Die schraffierte Fläche zeigt den Verlust durch Reflexion, Streuung, Absorption u.a. Die ein Bauteil erreichende Sonnenstrahlung setzt sich aus den folgenden drei Komponenten zusammen (s. 4.2.6.3):

- direkte Strahlung (abhängig vom Sonnenstand),
- diffuse Strahlung (beim Durchgang durch die Atmosphäre reflektierte und gestreute Strahlung),
- reflektierte Strahlung (bereits von anderen Flächen reflektierte Strahlung).

Im Bereich des sichtbaren Lichts werden rd. 50% der gesamten Energie eingestrahlt.

#### 4.4.3 Lichttechnische Grundgrößen

Der Kennzeichnung, Berechnung, Messung und Bewertung von Licht dienen folgende Grundgrößen nach [N 1], die auch für lichttechnische Bemessung der Tages- und/oder Kunstlichtbeleuchtung von Räumen von Bedeutung sind.

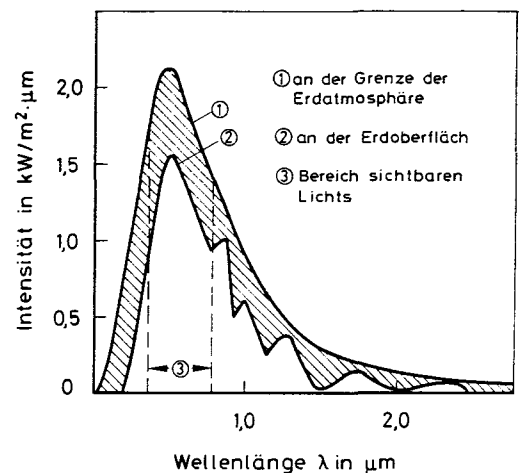


Bild 4.4.3 Intensität der Sonneneinstrahlung abhängig von der Wellenlänge

##### 4.4.3.1 Lichtmenge $Q$ :

Einheit: 1 Lumenstunde = 1 lmh

Darunter ist die von einer Lichtquelle ausgesandte oder von einem beleuchteten Körper empfangene, wahrnehmbare, also gemäß der spektralen Hellempfindlichkeit bewertete Lichtenergie zu verstehen.

##### 4.4.3.2 Lichtstrom $\Phi = Q/t$

Einheit: 1 Lumen = 1 lm

Der Lichtstrom ist die Lichtleistung, also die pro Zeiteinheit ausgesandte oder empfangene Lichtenergie.

##### 4.4.3.3 Lichtstärke $I = \Phi/\omega$

Einheit: 1 Candela = 1 cd = 1 lm/str

Von einer punktförmigen Lichtquelle wird Lichtenergie in alle Richtungen ausgesandt. Um die in einer bestimmten Richtung vorhandene Energiedichte beschreiben zu können, bedarf es der Einführung einer neuen geometrischen Größe, des sog. »Raumwinkels  $\omega$ «, der durch einen kegelförmigen Kugelausschnitt um die Lichtquelle dargestellt wird. Für den Raumwinkel wurde die Einheit »Stradian« [str] eingeführt.

##### 4.4.3.4 Beleuchtungsstärke $E = \Phi/F$

Einheit: 1 Lux = 1 lx = 1 lm/m<sup>2</sup>

Die Beleuchtungsstärke ist die Lichtstromdichte auf der beleuchteten Fläche, also der Quotient des auf eine Fläche  $F$  treffenden Lichtstroms  $\Phi$ , dividiert durch die Fläche.

##### 4.4.3.5 Leuchtdichte $L = I/F \cdot \cos \varphi$

Einheit: 1 cd/m<sup>2</sup>

Die Leuchtdichte ist die in Richtung eines Beobachters von einem leuchtenden oder beleuchteten Körper abgestrahlte Lichtstärke  $I$ , dividiert durch die scheinbare Fläche (Projektion) des Körpers (s. Bild 4.4.4). Damit gibt die Leuchtdichte Auskunft über den im Auge entstandenen Reiz, ist also ein Maß für den im Gehirn hervorgerufenen Helligkeitsein-

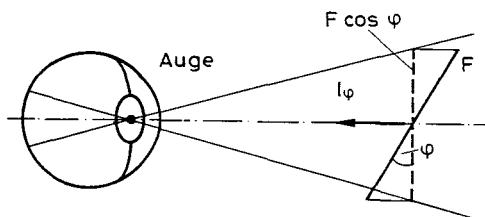


Bild 4.4.4 Definition der Leuchtdichte

druck. Eine Lichtquelle erscheint also um so heller, je größer ihre in Richtung Auge abgestrahlte Lichtstärke und je kleiner dabei die vom Auge gesehene Fläche ist.

#### 4.4.3.6 Photometrisches Entfernungsgesetz

Das photometrische Entfernungsgesetz besagt, daß die auf einer betrachteten Fläche auftretende Beleuchtungsstärke  $E$  sich aus der Lichtstärke  $I$  einer Lichtquelle, dem Abstand  $r$  zwischen Lichtquelle und Fläche, dem Strahlungseinfallswinkel  $\varepsilon$  und dem Raumwinkel  $\omega$  des ausgesandten Lichtstroms nach einem Quadratgesetz ergibt. Die Beleuchtungsstärke  $E$  einer Fläche nimmt mit dem Quadrat der Entfernung dieser Fläche von der Lichtquelle ab:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \varepsilon \cdot \omega$$

### 4.4.4 Optische Eigenschaften

#### 4.4.4.1 Begriffe

Lichtundurchlässige Körper reflektieren und absorbieren auftreffende Lichtströme, lichtdurchlässige transmittieren außerdem einen Teil (Bild 4.4.5). Dabei können der reflektierte und transmittierte Anteil sowohl in ihrer spektralen Zusammensetzung (Filterung einzelner Wellenlängenbereiche, Selektion) als auch in ihrer Verteilung (gerichtet, gestreut) verändert werden.

Der auftreffende Lichtstrom  $\Phi$  ist die Summe des reflektierten ( $\Phi_R$ ), absorbierten ( $\Phi_A$ ) und transmittierten Lichtstromanteils ( $\Phi_T$ ):

$$\Phi = \Phi_R + \Phi_A + \Phi_T \quad [\text{lm}] \quad (4.4.1)$$

Auf den auftreffenden Lichtstrom bezogen erhält man:

$$1 = \frac{\Phi_R}{\Phi} + \frac{\Phi_A}{\Phi} + \frac{\Phi_T}{\Phi} \quad (4.4.2)$$

Das Verhältnis  $\Phi_R/\Phi$  wird als Reflexionsgrad  $\varrho$  bezeichnet und gibt den Anteil der reflektierten Strahlung an der auftreffenden Strahlung an. Entsprechend werden  $\Phi_A/\Phi$  als Absorptionsgrad  $\alpha$  und  $\Phi_T/\Phi$  als Transmissionsgrad  $\tau$  bezeichnet.

Damit läßt sich Gl. 4.4.2 auch in folgender Form ausdrücken:

$$1 = \varrho + \alpha + \tau \quad (4.4.3)$$

Diese Beziehung ist im gesamten Bereich der optischen Strahlung gültig. Für undurchlässige Baustoffe wird  $\tau = 0$ , und es gilt:

$$1 = \varrho + \alpha \text{ oder } \alpha = 1 - \varrho \quad (4.4.4)$$

Wichtig für alle Erscheinungen und Maßnahmen in der Lichttechnik ist die Abhängigkeit der drei Größen voneinander. So ist z. B. eine Verringerung der transmittierten Anteile nur durch vermehrte Absorption und/oder Reflexion möglich. Bei der Festlegung der lichttechnischen Stoffkennzahlen ist deren Abhängigkeit von der spektralen Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges sowie den in DIN 5036 [N 2] vereinbarten Voraussetzungen über z. B. Lichtart (Normlichtart A), Polarisationszustand (nicht polarisiert, also Schwingungen in allen Richtungen quer zur Fortpflanzungsrichtung), Lichteinfall (quasiparallel, nicht diffus), Körperoberfläche (trocken und sauber) und Körperdicke (nur bei lichtdurchlässigen Körpern) zu beachten.

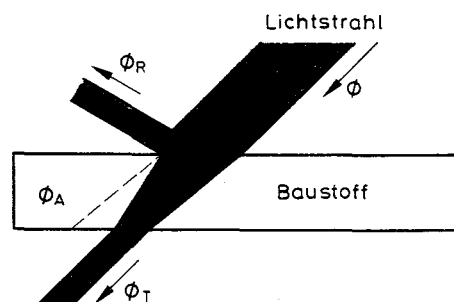


Bild 4.4.5 Reflexion, Absorption und Transmission von Licht beim durchlässigen Baustoff

#### 4.4.4.2 Transmission

Der Transmissionsgrad  $\tau$  (Lichtdurchlässigkeitsgrad) bezeichnet den gesamten transmittierten Lichtstromanteil in quantitativer Hinsicht. Über die Verteilung des Lichts und dessen spektrale Zusammensetzung (Selektivität) macht er keine Aussagen.

Da entlang des Transmissionsweges Absorption, bei eingelagerten Partikeln auch Reflexion, stattfindet und Absorption und Reflexion zur Weglänge proportional sind, hängt auch die Größe des transmittierten Lichtstroms von der Bauteildicke ab.

Stoffe mit einem Transmissionsgrad  $\tau > 35\%$  werden als stark durchlassend, solche mit  $\tau < 35\%$  als schwach durchlassend bezeichnet [N 2]. Dabei ist die Abhängigkeit von der Bauteildicke zu beachten. Tab. 4.4.1 enthält die mittleren Transmissionsgrade im sichtbaren Bereich des Sonnenlichts einiger Baustoffe. In Tab. 4.4.2 ist die Einteilung der Baustoffe hinsichtlich Transmission nach [N 2] gezeigt.

Der Transmissionsgrad von Glas und durchsichtigen Kunststoffen ist für die Ausleuchtung von Innenräumen mit Tageslicht von ausschlaggebender Bedeutung [3, N 4]. Bild 4.4.6 zeigt einen Vergleich für einige Gläser aus [1] bei zur Scheibenfläche normaler Einstrahlung ( $\beta = 0$ ). Für Fensterglas von rd. 3 mm Dicke ist der Transmissionsgrad innerhalb des Spektrums sichtbaren Lichts ziemlich konstant, er beträgt rd. 92%. Der Lichtverlust entsteht überwiegend durch Reflexion. Auch die längerwellige IR-Wärmestrahlung tritt kaum vermindert durch und führt zur Raumaufheizung.



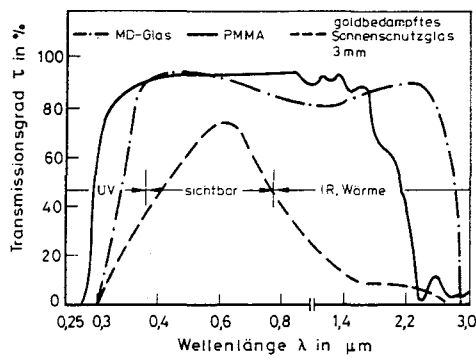


Bild 4.4.6 Lichtdurchlässigkeit einiger Gläser nach [1]

Der durchsichtige Kunststoff PMMA (Acrylglas; Plexiglas) verhält sich wie Fensterglas. Das außenseitig goldbedampfte Sonnenschutzglas (Reflexionsglas) weist eine deutlich verminderte Durchlässigkeit im sichtbaren, vor allem aber im IR-Bereich auf, wodurch die Sonnenschutzwirkung zustande kommt.

Die Lichtdurchlässigkeit von klarem Glas hängt stark vom Einfallswinkel  $\beta$  ab. Bei zur Scheibenebene normal auftreffendem Lichtstrom,  $\beta = 0$ , ist der Lichtverlust durch Reflexion am geringsten. Ab  $\beta > 60^\circ$  nimmt er deutlich zu. Bezüglich der Umsetzung der spektralen Lichtdurchlässigkeit eines durchlässigen Stoffs bestimmter Dicke in die Größen Durchlaßfaktor und Glaskennwert, die zur lichttechnischen Bemessung von Fenstern erforderlich sind, s. [4]

#### 4.4.4.3 Reflexion

Bild 4.4.7 zeigt die gerichtete oder spiegelnde Reflexion an Grenzflächen von zwei Medien, bei der der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel ist,  $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ . Daneben kann die Reflexion auch gestreut oder gemischt erfolgen (s. Bild 4.4.8). Bei lichtundurchlässigen und nur schwach durchlässigen Stoffen erfolgt die Reflexion im wesentlichen an der Oberfläche ( $\Phi_{R1}$ ). Für stark lichtdurchlässige Stoffe ist noch der Anteil ( $\Phi_{R2}$ ) von Bedeutung; alle weiteren Reflexionen können vernachlässigt werden. Die Brechung der durchgehenden Lichtstrahlen (Abweichung vom geradlinigen Durchgang) ist in der Lichttechnik von untergeordneter Bedeutung.

Der Reflexionsgrad  $\rho$  bezeichnet immer den gesamten reflektierten Lichtstromanteil, aber nur in quantitativer Hinsicht. Über dessen Verteilung und spektrale Zusammensetzung macht er keine Aussagen.

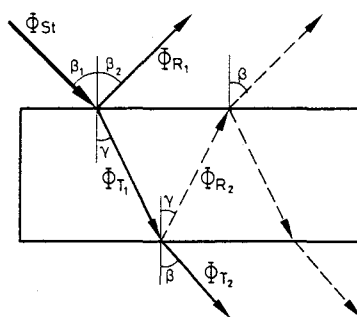


Bild 4.4.7 Gerichtete Reflexion beim durchlässigen Baustoff

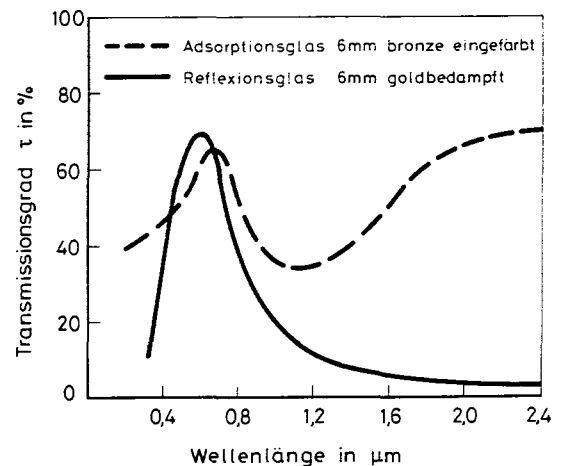


Bild 4.4.8 Lichtdurchlässigkeit von Adsorptions- und Reflexionsglas (Beispiele)

Die Größe des Reflexionsgrads hängt von mehreren Einflüssen ab. Körper mit heller Körperfarbe reflektieren mehr als solche mit dunkler. Unebene, strukturierte Oberflächen reflektieren mehr als ebene, allerdings ändert sich die Lichtverteilung. Bei lichtdurchlässigen Stoffen hängt der Reflexionsgrad auch von der Schichtdicke ab. Einen großen Einfluß übt der Einfallswinkel  $\beta$  des Lichtstroms aus. Trifft der Lichtstrahl normal auf das Bauteil, so ist der Reflexionsgrad am größten. Tab. 4.4.1 enthält die Reflexionsgrade verschiedener Baustoffe in Prozentangabe vom auffallenden Lichtstrom  $\Phi = 100\%$  (Angaben aus verschiedenen Quellen).

Die Eigenschaft der Reflexion wird mit unterschiedlichen Absichten genutzt. Die spiegelnde, gestreute und gemischte Reflexion lichtundurchlässiger Baustoffe wird für Fassadenelemente und für die Innenarchitektur mit gestalterischer Absicht eingesetzt. Die Reflexion wird darüber hinaus zum Sonnenschutz an verglasten Außenflächen aktiviert, indem insbesondere der Wärmestrahlungsanteil der optischen Strahlung der Sonne beim Durchtritt in den Raum behindert wird. Diese Schutzwirkung wird durch sog. Reflexionsgläser erzielt.

Die Reflexionsgläser werden durch metallische, dielektrische oder halbleitende Stoffe beschichtet. Beispielsweise wird durch Goldbedampfung, s. Bild 4.4.6, der IR-Durchgang und damit die Raumaufheizung beträchtlich vermindert. Durch Aufdampfen bestimmter Metalloxide (z. B.  $\text{TiO}_2$ ) in mehreren Schichten unterschiedlicher Brechung (dielektrische Schichten) kann der Reflexionsgrad gesteigert werden (optische Interferenz). Auch durch Aufdampfen von halbleitenden Metalloxiden können Transmission und Reflexion bei kontrollierter Rückemission der Wärmestrahlen erhöht werden. Näheres siehe in [1].

#### 4.4.4.4 Absorption

Die Absorption von Sonnenlicht in einem Körper ist die Umwandlung der kurzwelligen Strahlung der Sonne in Wärmeenergie, die den Körper als langwellige Wärmestrahlung und über Wärmeleitung wieder verläßt (vergl. Abschnitt 4.2.6).

In Körpern aus lichtundurchlässigen Stoffen findet dieser Strahlungsaustausch nur in der oberflächennahen Schicht statt. Von Einfluß sind also nur die stoffliche und strukturelle Beschaffenheit dieser Schicht, nicht jedoch die Körperdicke. Dunkle und raue Oberflächen absorbieren einen größeren Anteil als helle, blanke Flächen.

In lichtdurchlässigen Körpern hingegen findet die Absorption entlang des Transmissionsweges statt. Sie nimmt also mit der Dicke zu. In Tab. 4.4.1 sind die Absorptionsgrade einiger Baustoffe aufgeführt.

Tab. 4.4.1 Lichttechnische Eigenschaften einiger Baustoffe bei senkrechtem Lichteinfall (verschiedene Quellen)

Baustoff	$\rho$	$\tau$	$\alpha$	$\sigma$
	%	%	%	%
neuer Stuckputz	80	0	20	70–90
Marmor	45–65	5–15	20–45	75–90
trockener Beton	40–50	0	60–50	–
Porzellan	60–80	0	20–40	80–90
Fensterglas, 3 mm	8	90	2	–
Mattglas, 3 mm	12	80	8	4
Milchglas, 3 mm	55	30	15	80
Aluminium, chem. gegläntzt	85–90	0	10–15	–
Aluminium, poliert	65–75	0	25–35	–
Aluminium, matt	55–65	0	40–45	–
Chrom, poliert	60–45	0	35–40	–
Chrom, matt	40–45	0	55–60	–
Messing, poliert	60	0	40	–
Messing, matt	50–55	0	45–50	–
Stahl, blank	55–60	0	40–45	–
weißer Anstrich	70–80	0	20–30	75–85
gelber Anstrich	30–70	0	30–70	–
brauner Anstrich	10–50	0	50–90	–
roter Anstrich	10–35	0	65–90	–
grüner Anstrich	10–60	0	40–90	–
blauer Anstrich	5–50	0	50–95	–
schwarzer Anstrich	4–8	0	92–96	–

Die Eigenschaft der Absorption wird bei den sog. Absorptionsgläsern für den Sonnenschutz ausgenutzt. Absorptionsglas wird entweder molekular (Oxide des Kobalts, Kupfers, Nickels o. a.) oder kolloidal (Gold, Silber, Kupfer u. a.) eingefärbt. Durch die Art des Farbstoffs, durch dessen Konzentration sowie durch die Scheibendicke können Farbton, Transmission sowie die spektrale Verteilung der transmittierten Anteile beeinflusst werden. Absorptionsglas absorbiert einen großen Teil der eingestrahnten Energie. Es erwärmt sich dabei und dehnt sich aus. Bild 4.4.8 zeigt das unterschiedliche Transmissionsverhalten von Absorptions- und Reflexionsglas (Beispiele). Näheres siehe in [1] und [2].

#### 4.4.4.5 Lichtverteilung

Reflexion und Transmission können gerichtet, gestreut oder gemischt erfolgen, wie Bild 4.4.9 zeigt. Ausmaß und Art, wie

ein Körper Licht zu verteilen vermag, wird als Lichtverteilungs- oder Streuvermögen bezeichnet.

Der höchste Grad der Streuung, die vollkommene oder Lambertsche Streuung liegt vor, wenn der reflektierte oder der transmittierte Anteil unter allen Abstrahlungswinkeln zur Oberfläche stets die gleiche Leuchtdichte besitzt. Das Verteilungsvermögen wird bei lichtundurchlässigen Körpern ausschließlich durch die Oberflächenstruktur des Körpers, bei durchlässigen Körpern außerdem durch Einlagerungen anderer optischer Dichte und somit auch durch die Schichtdicke des Baustoffs beeinflusst. Die Oberflächenelemente und eingelagerten Elemente führen zu einer vielfachen Reflexion, Brechung und Beugung (Umlenkung an Hindernissen) der Lichtstrahlen und somit zu einer je nach Anzahl der Elemente mehr oder weniger starken Lichtzerstreuung. Die gerichteten Anteile werden mit dem Index  $r$ , die gestreuten mit  $d$  gekennzeichnet. So ist

$$\rho = \rho_r + \rho_d \quad (4.4.5)$$

$$\tau = \tau_r + \tau_d \quad (4.4.6)$$

Gerichteter und gestreuter Anteil unterscheiden sich u. a. dadurch, daß das photometrische Entfernungsgesetz (4.4.3.6) für den gerichteten Anteil von der Lichtquelle aus gilt, für den gestreuten Anteil dagegen von der streuenden Fläche aus, die als sekundäre Lichtquelle der Ursprung des gestreuten Anteils ist.

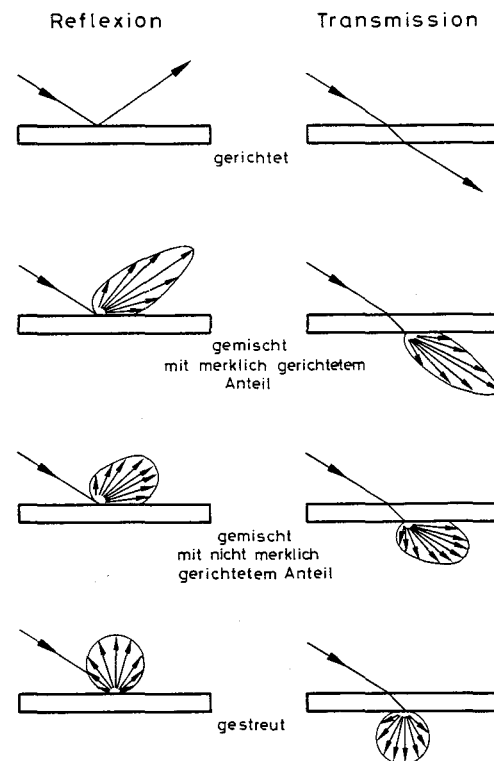


Bild 4.4.9 Arten der Lichtverteilung

Eine Kennzeichnung der Art der Lichtstreuung wird durch das Lichtstreuvermögen  $\sigma$  und den Halbwertswinkel  $\gamma$  möglich [N 3]. Diese werden wie folgt definiert:

#### a) Lichtstreuvermögen $\sigma$

Das Lichtstreuvermögen  $\sigma$  ist das Verhältnis des arithmetischen Mittelwertes der Leuchtdichten  $L$  bei den Abstrah-

lungswinkeln  $\varepsilon = 20^\circ$  und  $\varepsilon = 50^\circ$  zur Leuchtdichte beim Abstrahlungswinkel  $\varepsilon = 5^\circ$  bei senkrechtem Lichteinfall:

$$\sigma = \frac{L_{20} + L_{50}}{2 \cdot L_5} \quad (4.4.7)$$

b) Halbwertswinkel  $\gamma$

Der Halbwertswinkel  $\gamma$  ist derjenige Abstrahlungswinkel  $\varepsilon$ , bei dem die Leuchtdichte  $L$  den halben Wert der Leuchtdichte  $L_0$  des gestreut abgestrahlten Lichtes beim Abstrahlungswinkel  $\varepsilon = 0^\circ$  bei senkrechtem Lichteinfall besitzt:

$$L(\gamma) = \frac{L_0}{2} \quad (4.4.8)$$

In [N 3] ist die lichttechnische Klasseneinteilung von Werkstoffen bezüglich ihres Streuvermögens dargestellt (s. Tab. 4.4.2).

Einen Vergleich der Lichtverteilung von Bauteilen bei verschiedenen Beobachtungsrichtungen ermöglichen die Kennwerte Leuchtdichtefaktor und Leuchtdichtekoeffizient [N 3]:

c) Leuchtdichtefaktor

$$\beta = \frac{L}{L_w} \quad (4.4.9)$$

$L$  = Leuchtdichte der Probe für eine gegebene Beobachtungsrichtung

$L_w$  = Leuchtdichte der vollkommen streuenden Fläche bei ausschließlicher Reflexion bzw. Transmission und gleicher Beleuchtung

Einstrahlungs- und Abstrahlungsrichtung sind mit anzugeben.

d) Leuchtdichtekoeffizient

$$I = \frac{L}{E} \quad (4.4.10)$$

$L$  = Leuchtdichte der Probe für eine gegebene Beobachtungsrichtung

$E$  = Beleuchtungsstärke auf der Probe.

Einstrahlungs- und Abstrahlungsrichtung sind mit anzugeben.

#### 4.4.4.6 Selektivität

Licht kann in seiner spektralen Zusammensetzung bei der Reflexion und Transmission verändert werden. Die Fähigkeit eines Stoffes, bestimmte Strahlungsanteile (Wellenlängen) stärker zu absorbieren als andere, wird Lichtselektivität genannt.

Ein auf eine weiße oder graue Fläche treffender Lichtstrom wird reflektiert, ohne in seiner relativen spektralen Zusammensetzung verändert worden zu sein. Eine bunte Fläche jedoch reflektiert in erster Linie Licht der Wellenlänge, die

Tab. 4.4.2 Lichttechnische Einteilung von Baustoffen nach [N 2]

Hauptgruppe			Gruppe				Untergruppe		Beispiele
Nr.	Benennung	$\tau$ [%]	Nr.	Streuung	$\sigma$	$\gamma$	Nr.	gerichteter Anteil	
1	ausschließlich reflektierende Stoffe	0	1.1	schwach	$\leq 0,4$	$\leq 27^\circ$	1.1.1	nicht merklich	Reflexstoffe, Aluminium matt
							1.1.2	merklich	Glas- und Metallspiegel, Reflexstoffe
			1.2	stark	$> 0,4$	$> 27^\circ$	1.2.1	nicht merklich	Metallisierte Bildwände, Tapeten, matte Anstriche
							1.2.2	merklich	Ölfarbenanstriche, Emaille, Lackanstriche
2	schwach durchlassende, vorwiegend reflektierende Stoffe	$> 35$	2.1	schwach	$\leq 0,4$	$\leq 27^\circ$	2.1.1	nicht merklich	Textilien, Kunststoffe
							2.1.2	merklich	durchlässige Spiegel
			2.2	stark	$> 0,4$	$> 27^\circ$	2.2.1	nicht merklich	Dichte Gewebe, Lampenschirmpapier
							2.2.2	merklich	Trübgeläser (Reflexionsgläser), Lasurlacke, getrübbte Kunststoffe
3	stark durchlassende Stoffe	$> 35$	3.1	schwach	$\leq 0,4$	$\leq 27^\circ$	3.1.1	nicht merklich	Mattglas, Ornamentglas, Kunststoffe
							3.1.2	merklich	grobe Gewebe, Cellophan, Klarglas
			3.2	stark	$> 0,4$	$> 27^\circ$	3.2.1	nicht merklich	Trübgeläser (Transmissionsgläser), getrübbte Kunststoffe
							3.2.2	merklich	Trübgeläser, leicht getrübt

ihrer Farbe entspricht, absorbiert hingegen Licht anderer Wellenlängen. Entsprechend verhält sich ein farbiger, lichtdurchlässiger Körper bezüglich der Transmission. Sind in einem lichtdurchlässigen Körper streuende Partikel mit einem Durchmesser in der Größenordnung der Lichtwellenlänge eingelagert, so streuen sie Licht verschiedener Wellenlängen verschieden stark (Opaleszenzeffekt). Es gilt das Rayleighsche Gesetz, nach dem die Streuung umgekehrt proportional zur 4. Potenz der Wellenlänge ist, d.h. kurzwelligeres Licht wird stärker gestreut und somit beim Durchgang mehr geschwächt als langwelligeres. Die Lichtselektivität von Stoffen ist bei der Raumbeleuchtung und farblichen Raumgestaltung, auch hinsichtlich der Farbveränderungen des Lichts und der Farbwiedergabe im Raum, zu beachten.

#### 4.4.5 Normen, Richtlinien

- [N 1] DIN 5031: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik. 9 Blätter, erschienen zwischen 1971 und 1977.
- [N 2] DIN 5036: Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien. Bl. 1, 2.80; T. 1, 7.78; T. 3, 11.79 und T. 4, 8.77.
- [N 3] DIN 5033: Farbmessung. 9 Blätter, erschienen zwischen 1972 und 1981.
- [N 4] DIN 5034: Innenraumbeleuchtung mit Tageslicht. Bl. 1, 11.63; Bl. 2, 6.66; T. 1, 10.80 und T. 4, 12.81.

#### 4.4.6 Literatur

- [1] Klindt, L. B. und W. Klein: Glas als Baustoff. Verlagsges. R. Müller, Köln-Braunsfeld, 1977.
- [2] Persson, R.: Wärmeabsorbierende und wärmerespektierende Gläser. VDI-Zeitung 110 (1968), S. 9/15.
- [3] Gertis, K.: Fenster und Sonnenschutz. Glaswelt 1972, Heft 4, S. 202/213.
- [4] Petzold, A. und H. Maruch: Der Baustoff Glas. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 2. Auflage 1976.

## 4.5 Verschleiß und Abnutzung

### 4.5.1 Bautechnische Bedeutung

Sämtliche Baustoffe erfahren während ihrer Lebensdauer Veränderungen. In diesem Abschnitt werden in knapper Form die Veränderungen und Substanzverluste an Oberflächen durch mechanische Einwirkungen infolge von Nutzung besprochen, die als Verschleiß und Abnutzung bezeichnet werden. Verschleiß und Abnutzung mindern in der Regel die Tragfähigkeit nicht, sondern verkürzen die Gebrauchsdauer.

Verschleiß tritt im Bauwesen in vielen Gebieten auf. Sämtliche ebenen Beläge, die begangen und/oder befahren werden, erfahren Verschleiß. Beispiele: Straßen- und Wegebau, Industrieböden, Bodenbeläge aller Nutzungsbereiche, Sportstätten etc. Im Wasserbau führt strömendes Wasser zu Verschleiß durch Erosion und Kavitation.

Der Verschleißwiderstand eines Stoffes stellt ein wichtiges Auswahlkriterium für Baustoffe dar, die eine hohe Beanspruchung durch Abnutzung erfahren. Abschn. 4.5.7 enthält die Normen mit den baustoffabhängigen Verschleißprüfungen u.a.

### 4.5.2 Begriffe und Vorgang

Unter Verschleiß ist der fortschreitende Materialverlust aus der Oberflächenschicht eines Bauteils zu verstehen, der durch Kontakt, Kontaktdruck und Relativbewegungen eines anderen, den Verschleiß erzeugenden Körpers entsteht. Durch Verschleiß werden kleinste Teilchen losgetrennt; er erzeugt Abnutzung, Abrieb und andere Formen von Verschleißerscheinungen [N 14]. Abnutzung erweitert den Begriff »Verschleiß«, indem hierunter auch die witterungsbedingten Materialverluste eingeschlossen werden.

### 4.5.3 Elemente des Verschleißvorgangs

Am Verschleißvorgang sind i.d.R. vier stoffliche Partner-Elemente beteiligt, die in Bild 4.5.1 dargestellt sind. Dies sind der Grund- und Gegenkörper, der Zwischenstoff im Kontaktbereich sowie das umgebende Medium. Tab. 4.5.1 ordnet für einige Beispiele die Partner. Im Bauwesen ist das Hauptaugenmerk auf den Verschleiß des Bauteils, in Tab. 4.5.1 Grundkörper, gerichtet. Gleichwohl gibt es im Innen-

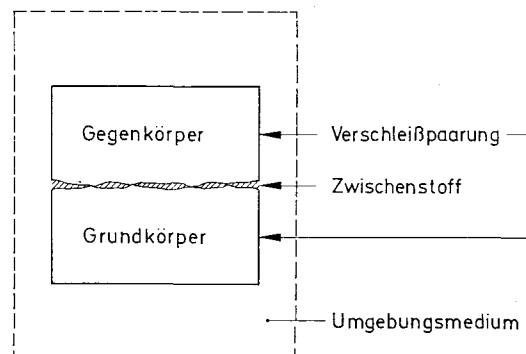


Bild 4.5.1 Schema der Verschleißpartner

ausbau viele Fälle, in denen Grund- und Gegenkörper Teilelemente eines Bauteils sind und beide Verschleiß erfahren. Der Gegenkörper und Zwischenstoff können fest, flüssig oder gasförmig sein oder in Mischung vorliegen. Das Umgebungsmedium ist im Bauwesen die Umgebungsluft, beschrieben durch Temperatur und rel. Feuchte.

Tab. 4.5.1 Beispiele für Verschleißpartner

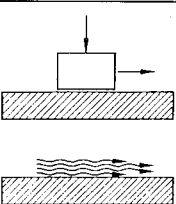
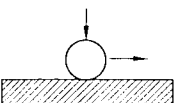
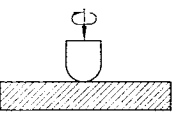
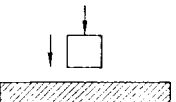
Grundkörper	Gegenkörper	Zwischenstoff	Umgebungsmedium
Straßenoberfläche	Reifen	Abrieb, Staub, Eis, Wasser	Luft
Fußbodenbelag	Schuhsohle Schuhabsatz	Staub, Reinigungsmittel	Luft
Wehrüberlauf	strömendes Wasser	keine	Luft

#### 4.5.4 Einflußgrößen des Verschleißvorgangs

##### 4.5.4.1 Beanspruchungsarten und -größen

Die Art der Beanspruchung kann den in Tab. 4.5.2 dargestellten elementaren Bewegungsformen zugeordnet werden, wobei Kombinationen auftreten können. Der Grundkörper ist stets ein fester Stoff; der Gegenkörper kann fest, flüssig oder gasförmig sein. Entsprechend umfaßt das Gleit-

Tab. 4.5.2 Arten der Beanspruchung

Art	Symbol
Schieben Gleiten Strömen	
Rollen	
Bohren	
Prallen	

ten sowohl das Schleifen bei festem Grund- und Gegenkörper als auch das Strömen bei flüssigem oder gasförmigem Gegenkörper. Beim Gleiten, Rollen und Bohren finden Gleitwege, verbunden mit Reibung, statt. Tab. 4.5.3 gibt Beispiele für Arten und Ursachen von Beanspruchungen.

Die Beanspruchung umfaßt folgende Größen:

Normalkraft  $F_N$

Relativgeschwindigkeit  $v$  zwischen Grund- und Gegenkörper

Temperatur im Kontaktbereich

Beanspruchungsdauer

Die Normalkraft  $F_N$  erzeugt in der nominellen Kontaktfläche eine Flächenpressung. Tatsächlich ist jedoch die reale Flächenpressung wegen der Oberflächenrauigkeit größer. Die reale Flächenpressung erfährt durch den Verschleiß Veränderungen (Aufrauen und Einebnen). Bei den Beanspruchungen Gleiten, Rollen und Bohren herrscht eine relative Verschiebegeschwindigkeit  $v$  parallel zur Kontaktfläche. Dies bedeutet, daß die Haftreibung überwunden wurde und auf die Oberfläche des Grundkörpers die Gleit- oder Rollreibungskraft

$$F_R = \mu F_N$$

einwirkt, die für das Lostrennen von Verschleißteilchen verantwortlich ist.  $\mu$  ist hierin der Reibungskoeffizient. Er hängt nicht von der Größe der Kontaktfläche, sondern von der Oberflächenbeschaffenheit und der Werkstoffpaarung ab. Nach [N 14] unterscheidet man verschiedene Arten der Reibung. Im Bauwesen ist bei den üblichen Verschleiß- und

Tab. 4.5.3 Beispiele für Beanspruchungsarten

Beanspruchungsarten			
Gleiten Schleifen	Rollen	Kratzen, Fräsen, Bohren	Schlagen, Prallen
Fußgänger Fahrzeuge bremsend oder in Kurven weiche Bereifung	Fahrzeuge in der Geraden  harte Bereifung	Spike- Reifen Schnee- ketten	Aufprall von Steinen  Uneben- heiten, Kanten beim Kfz-Ver- kehr
Schieben von Kisten u. ä. rut- schendes Stückgut strö- mendes Wasser	Transport auf Rollen		

Abnutzungsproblemen (Brückenlager o.ä. ausgenommen) im Kontaktbereich kein Schmiermittel vorhanden. Es liegt der Regelfall der trockenen Reibung vor (Wasser wirkt nicht als Schmierung). Verschleiß und Abnutzung nehmen mit Zunahme der Flächenpressung zu. Der Reibungsbeiwert kann überschlägig Handbüchern entnommen werden. Er ist streng genommen keine Konstante für eine bestimmte Verschleißpaarung, sondern auch von Verschiebeweg und Verschiebegeschwindigkeit abhängig. Reibung ist stets mit Wärmeentwicklung verbunden, die zu tribochemischen Reaktionen führen kann, s. [N 14].

#### 4.5.4.2 Eigenschaften der Elemente

Der Verschleißvorgang wird von den Eigenschaften der Elemente beeinflusst. Dabei sind die Größe der Elemente, deren Rauigkeit im Kontaktbereich, Struktur und sämtliche mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften von Einfluß. Dabei können diese Eigenschaften durch Verschleiß verändert werden. Grundkörper und Gegenkörper stehen in Wechselwirkung. Erst in der bestimmten Verschleißpaarung entsteht Verschleiß.

#### 4.5.5 Mechanismen und Erscheinungsformen von Verschleiß

Im Bauwesen sind als Mechanismen die Abrasion und Oberflächenzerrüttung von Bedeutung. Bei der Abrasion geht ein Abtrag an der Oberfläche vor sich. Durch die Oberflächenzerrüttung erfolgt eine Lockerung des Gefüges. Die Erscheinungsformen sind vielfältig [N 14] und hängen von der Art, Größe und Dauer der Beanspruchung und von der Verschleißpaarung ab. In jedem Fall handelt es sich i.d.R. um Vertiefungen der Oberfläche gegenüber dem Ausgangszustand.

#### 4.5.6 Prüfung und Messung von Verschleiß

##### 4.5.6.1 Verschleiß-Meßgrößen

Durch die Verschleiß-Meßgrößen wird eine zahlenmäßige Angabe der Veränderungen im Oberflächenbereich des Grundkörpers gegeben. Dabei unterscheidet man zwischen direkten, bezogenen und indirekten Meßgrößen. Bei den direkten Meßgrößen wird der Verschleißbetrag (Änderungen der Abmessungen, Masseänderungen) angegeben. In den bezogenen Meßgrößen wird der Verschleißbetrag auf eine charakteristische Größe bezogen: z.B. Beanspruchungsweg, -dauer, etc. Die indirekten Meßgrößen geben Auskunft über die Gebrauchsdauer bis ein Bauteil infolge von Verschleiß seine Gebrauchsfähigkeit verliert.

##### 4.5.6.2 Verschleißprüfung und -messung

Die Prüfung und Messung von Verschleiß kann entweder direkt am Bauteil unter realen Beanspruchungsbedingungen oder indirekt im Labor erfolgen. Die direkte Methode ergibt Meßgrößen großer Zuverlässigkeit, jedoch erst nach

längerer Zeit. Die indirekte Labormethode birgt die bekannte Schwierigkeit der Übertragbarkeit der Meßergebnisse auf das reale Verhalten in sich.

Die Prüfung von Verschleiß erfolgt nach Normen, in denen das Verfahren der Prüfung und der Messung auf den zu untersuchenden Werkstoff und dessen Beanspruchung im eingebauten Zustand abgestimmt ist. Im Abschnitt 4.5.7 werden die wesentlichen Normen zur Prüfung von horizontalen Belägen unterschiedlicher Werkstoffbasis aufgeführt. Darüber hinaus wird auf die Arbeitsblätter der AGI, Arbeitsgemeinschaft für Industriebau, Köln, verwiesen.

#### 4.5.7 Normen, Richtlinien

- [N 1] DIN 272: Magnesiaestriche, 5.2.4 Prüfung der Abnutzbarkeit (nach DIN 52108); 03.78.
- [N 2] DIN 1100: Hartstoffe für zementgebundene Hartstoffestriche; 05.79.
- [N 3] DIN 16950: Vinyl-Asbest-Platten; 04.77.
- [N 4] DIN 16951: Polyvinylchlorid (PVC)-Beläge ohne Träger; Verschleißverhalten nach DIN 51963; 04.77.
- [N 5] DIN 16952: Polyvinylchlorid (PVC)-Beläge mit Träger; Verschleißverhalten nach DIN 51963; 12.80.
- [N 6] DIN 18171: Linoleum; Verschleißverhalten nach DIN 51963/51964; 02.78.
- [N 7] DIN 18173: Linoleum-Verbundbelag; Verschleißverhalten nach DIN 51963/51964; 02.78.
- [N 8] DIN 51963: Verschleißprüfung; (20-Zyklen-Verfahren); 12.80.
- [N 9] DIN 51964: Bestimmung der Nuttschichtdicke; 08.75.
- [N 10] DIN 52108: Verschleißprüfung mit der Schleifscheibe nach Böhme; 08.68.
- [N 11] DIN 54322: Bestimmung der Abnutzung textiler Fußbodenbeläge; Tretradversuch nach Lisson; E 05.81.
- [N 12] DIN 54323: Bestimmung der Abnutzung textiler Fußbodenbeläge; Trommelversuch; 04.77.
- [N 13] DIN 54324: Bestimmung der Abnutzung textiler Fußbodenbeläge; Stuhlrollenversuch; 02.76.
- [N 14] DIN 50320: Verschleiß, Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen; Gliederung des Verschleißgebietes; 12.79.
- [N 15] DIN 50321: Verschleiß-Meßgrößen; 12.79.
- [N 16] DIN 50332: Strahl-Verschleißprüfung; 08.57.
- [N 17] DIN EN 102: Keramische Fliesen und Platten; Bestimmung des Widerstandes gegen Verschleiß. Unglasierte Fliesen und Platten; 10.56.
- [N 18] DIN 483: Bordsteine, Beton; Verschleißverhalten nach DIN 52108; 08.81.
- [N 19] DIN 485: Gehwegplatten aus Beton; 08.79.
- [N 20] DIN 18501: Pflastersteine, Beton; E 03.81.
- [N 21] DIN 18500: Betonwerkstein; 08.76.
- [N 22] DIN 18035: Sportplätze, Tennenflächen; Teil 5: Anforderungen, Prüfung, Pflege; E 10.80.
- [N 23] DIN 18035: Sportplätze: Teil 6: Kunststoff-Flächen, Anforderungen, Prüfung, Pflege; 04.78.
- [N 24] DIN 53754: Prüfung von Kunststoffen; Bestimmung des Abriebs nach dem Reibradverfahren; 06.77.

- [N 25] DIN 1045: Beton- und Stahlbetonbau, Bemessung und Ausführung. 6.5.7.5 Beton mit hohem Abnutzungswiderstand; 12.78.
- [N 26] Merkblatt zum Erfassen des Verschleißes und der Verformungen von Fahrbahnbefestigungen.
- [N 27] Merkblatt für die Beseitigung von Verschleißschäden an bituminösen Decken.
- [N 28] DIN 53516: Prüfung von Kautschuk und Elastomeren; Bestimmung des Abriebs; 01.77.
- [N 29] DIN 53528: Prüfung von gummierten Textilien; Verschleißprüfung durch Scheuern. Bestimmung des Abriebs mit dem Frank-Hauser-Gerät; 01.80.

## 4.6 Brandverhalten

### 4.6.1 Bautechnische Bedeutung

Die Katastrophe »Brand« als Vernichter von Leben sowie von Hab und Gut hat bis heute nichts von ihrem Schrecken und ihrer Bedeutung eingebüßt. Auch wenn die heutigen Tragwerke überwiegend aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen, so nimmt die Zahl der jährlichen Brandfälle zu. Nach [1] entstehen in der Bundesrepublik Deutschland pro Jahr rd. 400000 Brandfälle, denen rd. 500 Menschen zum Opfer fallen und die einen Sachwertverlust von rd. 2 Milliarden DM ( $\pm 1\%$  des jährlichen Bauvolumens) nach sich ziehen. Die Gefahrenabwehr durch vorbeugenden baulichen Brandschutz gewinnt deshalb zunehmende Bedeutung. Der bauliche Brandschutz hat folgende wesentliche Aufgaben zu erfüllen:

- Vorbeugende Maßnahmen gegen die Entstehung und Ausbreitung von Schadenfeuer durch Verwendung widerstandsfähiger Baustoffe und Konstruktionen sowie durch die Wahl von Sicherheitsabständen zwischen Gebäuden und von Brandabschnitten innerhalb der Gebäude,
- Anordnung von Fluchtwegen, von rauch- und brandhemmenden Einrichtungen zum Schutz und zur Rettung von Bewohnern,
- Ermöglichung einer wirksamen Brandbekämpfung durch die Feuerwehr und anderes mehr.

Diese Aufgaben sind als gesetzliche Forderungen (Grundsatz- und Einzelanforderungen) sowohl in der Musterbauordnung der Bundesrepublik Deutschland (MBO) als auch in den Landesbauordnungen (LBO) enthalten (bauaufsichtliche Brandschutzvorschriften). Gleichsam flankierend zu den LBO haben die Länder außerdem Durchführungsverordnungen für übliche bauliche Anlagen und Sonderverordnungen für bauliche Anlagen besonderer Art und Nutzung (z. B. Garagen, Geschäftshäuser usw.) erlassen. Die LBO und die Verordnungen werden durch die Technischen Baubestimmungen und durch Verwaltungsvorschriften ergänzt. Bei den ersteren ist vorrangig die DIN 4102, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen zu nennen, deren Aufbau in Bild 4.6.1 dargestellt ist [N 1]. In [1] werden die Bezüge zwischen den LBO, den Verordnungen, Verwaltungsvorschriften und den Technischen Baubestimmungen erläutert.

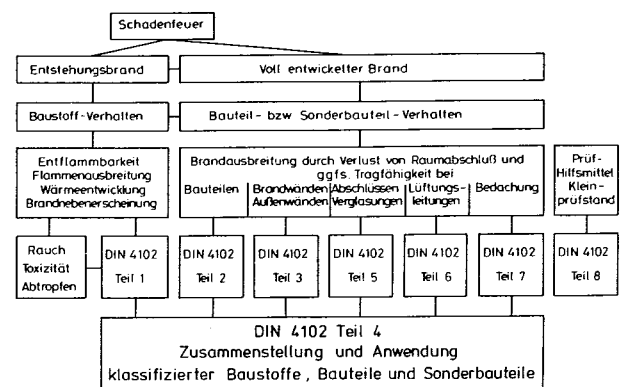


Bild 4.6.1 Baulicher Brandschutz im Bereich von DIN 4102 (Schema, aus [1])

### 4.6.2 Brandentstehung und Brandablauf

Ein Brand ist ein stofflicher Umsatz, der mehrere Teilvorgänge umfaßt. Der wichtigste Teilvorgang ist die Verbrennung der brennbaren Bestandteile (Lagergut, Einrichtungen, Konstruktion u. a.). Hierbei wird Energie in Form von Licht und Wärme frei. Es entstehen hohe Temperaturen, und die brennbaren Baustoffe werden vernichtet. Aber auch die nichtbrennbaren Baustoffe erfahren durch hohe Temperaturen Änderungen ihrer Eigenschaften, die bis zu ihrer Zerstörung führen können.

Der Ablauf eines Brandes ist durch die Zeitabschnitte Brandentstehung und voll entwickelter Brand gekennzeichnet, s. Bild 4.6.2. Ein Brand entsteht an einer örtlich begrenzten Stelle durch Zündung (z. B. Kurzschluß als Zündquelle), an der sich entflammbare Stoffe befinden. Unter Entflammbarkeit eines Stoffes versteht man dessen Eigenschaft, bei Temperaturerhöhung entzündliche Gase abzuscheiden. Die Brennbarkeit ist dann gegeben, wenn der Stoff bei Temperaturerhöhung Verbindungen mit dem Luftsauerstoff eingeht; dabei wird eine solche Wärmemenge freigesetzt, so daß der Stoff nach Entflammung ohne weitere externe Wärmezufuhr weiterbrennt.

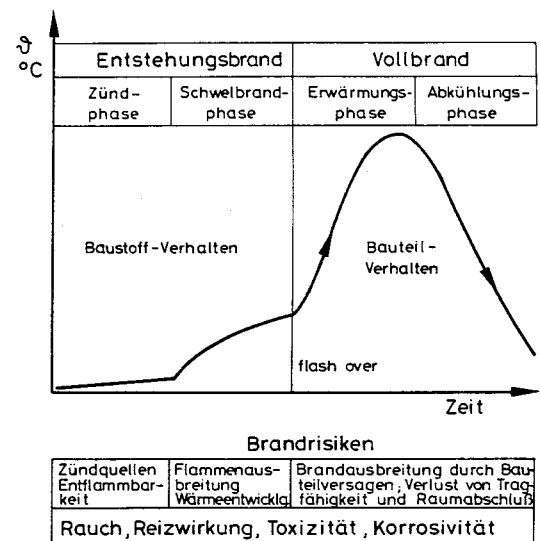


Bild 4.6.2 Brandphasen, Brandtemperaturen und Brandrisiken (schematisch, aus [1])

Auf die Zündphase folgt während der Brandentstehung die Schwelbrandphase. Dabei nehmen die Wärme und die Menge entzündlicher Gase so weit zu, daß alle brennbaren Stoffe plötzlich entzündet werden. Dieses Ereignis, mit »flash over« (Feuersprung) bezeichnet, leitet den voll entwickelten Brand ein.

Der Vollbrand kann in die Erwärmungs- und in die Abkühlphase untergliedert werden. Die Erwärmungsgeschwindigkeit und die entstehenden Temperaturen hängen von der Masse der brennbaren Stoffe und deren Heizwert, von der Ventilation und von vielen anderen Faktoren ab, die in [7] geschildert werden.

## 4.6.3 Brandverhalten von Baustoffen

### 4.6.3.1 Grundlegende Vorgänge

Das Brandverhalten von Baustoffen wird, vor allem in der Phase des Entstehungsbrandes, von folgenden Teilproblemen bestimmt:

- Entflammbarkeit
- Flammenausbreitung
- Wärmeentwicklung
- Brandnebenerscheinungen

Ist die Zündenergie ausreichend hoch, so entwickeln vor allem organische Baustoffe Gase durch Zersetzung und chemische Reaktionen. Diese Gase sind hauptsächlich Kohlenmonoxid und/oder leichte Kohlenwasserstoffe. Die Gase brennen bei ausreichend hoher Konzentration und Temperatur ohne weitere Wärmezufuhr ab. Die Flammenausbreitung auf der Baustoffoberfläche hängt von den vielfältigen Transportvorgängen von thermischer Energie ab: Strahlung der Flamme, Konvektion der Heizgase, Wärmeleitung im Stoffinneren und anderes mehr.

Die Wärmeentwicklung beim Abbrand hängt nicht nur von der Masse, Verteilung und dem Heizwert des Stoffes, sondern auch von der Wärmeabfuhr aus der Brandzone und von der Luftzufuhr zur Flamme (Sauerstoffangebot) ab.

Unter Brandnebenerscheinungen wird die Entwicklung von Rauch und toxischen Brandgasen verstanden. Diese beiden Brandrisiken sind für Flucht, Rettung und Brandbekämpfung von großer Bedeutung.

### 4.6.3.2 Einteilung der Baustoffe nach DIN 4102

Nach DIN 4102 Teil 1 unterscheidet man zwischen nichtbrennbaren und brennbaren Baustoffen, s. Tab. 4.6.1. Dabei werden als Baustoffe nicht nur jene für die Tragkonstruktionen sondern auch solche für Bekleidungen, Beschichtungen, Dämmschichten, Rohre, Verbundwerkstoffe u.a. verstanden. Die Norm enthält neben den Begriffen, Anforderungen und Kennzeichnungen auch die Verfahren zur Prüfung des Brandverhaltens von Baustoffen.

Die Baustoffklasse A 1 der nichtbrennbaren Baustoffe umfaßt in erster Linie die klassischen, anorganischen Stoffe. Zur Baustoffklasse A 2 gehören Baustoffe neuerer Art, die zwar im gewissen Umfang brennbare Bestandteile enthalten, jedoch bezüglich Rauchentwicklung und Toxizität der Brandgase ein nur geringes Brandrisiko darstellen. Die Baustoffe A 2 bedürfen in der Regel eines Prüfzeichens des

Instituts für Bautechnik (IfBt) (Eignungsnachweis und Güteüberwachung).

Zu den schwerentflammbaren Baustoffen B 1 (stets mit Eignungsnachweis) gehören zahlreiche Dämmstoffe, Ausbaubeläge aus Kunststoffen u.a. Sie enthalten nennenswerte Mengen brennbarer Bestandteile, deren Entflammbarkeit durch verschiedene Maßnahmen reduziert wird. Beispielsweise kann durch Zugabe von Feuerschutzmitteln in die Reaktion des Brandgases mit Luftsauerstoff eingegriffen werden.

Zu den normalentflammbaren Baustoffen B 2 gehören Holz, Holzwerkstoffe mit einer Dicke > 2 mm, Tafeln und Rohre aus PVC hart, Reaktionsharzmörtel und -beton u.a. Die Eignung muß durch ein Prüfzeugnis belegt sein.

Die leichtentflammbaren Baustoffe B 3 (Einbauzustand) dürfen im Bauwesen nicht verwendet werden.

### 4.6.3.3 Brandverhalten von Holz

Holz ist ein organischer und brennbarer Baustoff; er wird als normalentflammbar B 2 eingestuft. Bei Erwärmung wird die Holzsubstanz chemisch und thermisch zersetzt (Pyrolyse). Es bilden sich brennbare Gase aus Kohlenwasserstoffen, die nach Erreichen der Zündtemperatur zum Abbrand ohne zusätzliche äußere Energiezufuhr führen. Die Entzündungstemperatur hängt von der Dauer der Vorerwärmung ab und liegt bei längerer Erwärmung bei rd. 150 °C. Die größte Gasentwicklung tritt bei rd. 400 °C auf, sie nimmt ab rd. 500 °C wieder ab. Ab dieser Temperatur setzt die verstärkte Bildung von Holzkohle an der Oberfläche der Holzprobe oder des Holzbauteils ein [2, 5].

Da die Wärmeleitfähigkeit der Holzkohle nur ein 1/3 der des Holzes beträgt, stellt die Holzkohle eine wirkungsvolle Wärmedämmschicht um das brandbeanspruchte Holzbauteil dar. Dieser natürliche Schutz erklärt den beobachteten höheren Brandwiderstand von Holzkonstruktionen, als man vom Baustoffverhalten her zunächst vermuten würde.

### 4.6.3.4 Brandverhalten von Kunststoffen

Kunststoffe bestehen überwiegend aus organischen und daher brennbaren Bestandteilen. Sie werden als schwer- bis normalentflammbare Baustoffe eingestuft. Das mechanische Verhalten der Kunststoffe weist – im Gegensatz zu den anorganischen Baustoffen – bereits im Bereich der Gebrauchstemperaturen des Bauwesens eine Abhängigkeit von der Temperatur auf (s. Abschn. 5.4) [8]. Mit Temperaturzunahme ist eine von der Struktur abhängige, zunehmende Verweichung zu beobachten. Aus diesem Grund ist der Brandwiderstand tragender Kunststoffbauteile als gering einzustufen.

Höhere Temperaturen führen zur Zersetzung (Kettenbruch, Abspaltung von Substituenten, Oxidation). Dabei werden niedermolekulare Kohlenwasserstoffe abgespalten, die mit dem Luftsauerstoff brennbare Gase bilden. Kunststoffe brennen unter Entwicklung von sichtmindernden und toxischen Rauchgasen ab (Stickoxid, Salzsäure u.a.). Beim Brand von chlorhaltigen Kunststoffen wird Chlorwasserstoffgas abgespalten, das bei Kondensation auf Stahl- und Massivbauteilen stahlkorrosiv wirkt. Häufig findet auch das Abtropfen brennender Teile statt.



Tab. 4.6.1 Baustoffklassen nach DIN 4102 Teil 1

Baustoffklasse		Bauaufsichtliche Bezeichnung	Beispiele	Anwendungsbeispiele <sup>1)</sup>
A nicht- brennbare Baustoffe	A 1	nichtbrennbare Baustoffe	Sand, Lehm, Kies, Gips, Zement, Beton, Glas, Steine, Metall, Asbest, Steinzeug, Keramik	Feuerbeständige tragende und aussteifende Bauteile, Brandwände; Feuerhemmende Kellerdecken von Einfamilienhäusern;
	A 2	nichtbrennbare Baustoffe	Gipskartonplatten, Mineralfaserplatten mit organischen Bindemitteln	Lüftungsrohre etc.; Treppen, Bekleidungen, Dächer von Hochhäusern
B brennbare Baustoffe	B 1	schwerentflammbare Baustoffe	Holzwoleleichtbau-, Gipskartonplatten, Asbestpappe, -papier u. a.	Dämmstoffe, Bekleidungen, leichte Trennwände, Bodenbeläge, Haustechnik u. a.
	B 2	normalentflammbare Baustoffe	Holz und Holzwerkstoffe mit $d > 2$ mm; PVC-Beläge, Linoleum, Dachpappen u. a.	tragende Holzkonstruktion DIN 4102, Teil 4, Ausbau, Möbelbau, Bodenbeläge, Haustechnik u. a.
	B 3	leichtentflammbare Baustoffe	Holz mit $d < 2$ mm, Papier	Bei Leichtentflammbarkeit im Einbauszustand ist die Anwendung untersagt

<sup>1)</sup> s. konstruktive Durchbildungsregeln von DIN 4102, Teil 4

Die Entflammbarkeit von Kunststoffen kann durch Zugabe von Chlor oder Brom (Halogenisierung) erschwert werden. Beim Brand schirmen die Halogendämpfe den Zutritt von Luftsauerstoff ab. Nachteilig ist aber der bereits erwähnte toxische und korrosive Einfluß der Dämpfe. Daneben gibt es noch andere Möglichkeiten der Brandschutzausrüstung von Kunststoffen (s. [3, 4]).

#### 4.6.4 Brandverhalten von Bauteilen

##### 4.6.4.1 Feuerwiderstand, Feuerwiderstandsdauer

Sobald sich ein Entstehungsbrand zum Vollbrand entwickeln konnte, wird das Verhalten der Bauteile und des Tragwerks nicht nur vom Brandverhalten der Baustoffe, sondern darüber hinaus von zahlreichen anderen Einflüssen bestimmt, auf die noch eingegangen wird.

Der Schutz von Leben und Sachwerten erfordert, daß insbesondere die für die Sicherheit wesentlichen Bauteile einen bestimmten, eben der Schutzaufgabe entsprechenden Feuerwiderstand besitzen. Beim Versagen im Brandfall kann man zwischen dem Verlust an Tragfähigkeit und/oder dem Verlust an Raumabschluß unterscheiden. Dies führt zu folgenden Definitionen bzw. zu folgenden Anforderungen an den Feuerwiderstand abhängig von der Schutzaufgabe:

- a) Die Tragfähigkeit tragender und/oder aussteifender Bauteile darf im Brandfall während einer gewissen, erforderlichen Zeitdauer nicht verloren gehen.
- b) Der Raumabschluß, den die einen Brandherd umschließenden Bauteile gewährleisten, darf während einer gewissen, erforderlichen Zeitdauer nicht verloren gehen, um die Brandausbreitung zu verhindern. Die Bauteile

müssen hierbei durch ihren Wärmedurchlaßwiderstand die Entzündung brennbarer Stoffe außerhalb des Brandraums verhindern.

Die im Brandfall auf tragende und/oder aussteifende Bauteile einwirkenden Lasten sind die Gebrauchslasten und ggf. zusätzliche Wirkungen infolge des Brandes (Zwängungskräfte).

Die erforderliche Zeitspanne, innerhalb der ein Verlust an Tragfähigkeit oder Raumabschluß während eines Brandes nicht eintreten darf, wird als Feuerwiderstandsdauer bezeichnet. Sie hängt von vielen Faktoren ab: Art, Zweck, Grundriß des Gebäudes; Größe, Art, Verteilung brennbarer Stoffe (Brandlast), sicherheitsbezogene Bedeutung des Bauteils; Vorhandensein von Fluchtwegen und Rettungsmöglichkeiten sowie andere Faktoren. Letztendlich ist die Feuerwiderstandsdauer auch jener Zeitraum, der für Flucht, Rettung und Brandbekämpfung notwendig ist.

Die an die Schutzaufgabe eines Bauteils anzupassende Feuerwiderstandsdauer wurde aus Erfahrungen abgeleitet und ist in Normen festgelegt. Es ist üblich, sie in Minuten auszudrücken. Die Klassifikationen F 30, F 60, F 90 ... kennzeichnen den jeweiligen Feuerwiderstand eines Bauteils. Sie werden auch von DIN 4102 Teil 2 benutzt und dienen außerdem zur vergleichenden Beurteilung von Bauteilen.

##### 4.6.4.2 Temperaturentwicklung während eines Brandes

- Die oben definierte Feuerwiderstandsdauer in Minuten gewinnt erst Sinn, wenn ihr der Zeitverlauf der Temperatur im Brandraum, insbesondere in unmittelbarer Nähe des Bauteils, zugeordnet wird. Verständlicherweise liegen Temperaturmeßwerte von natürlichen Bränden nicht vor.

Gestützt auf Schadensauswertungen u. a. hat man versucht, die Temperaturentwicklung natürlicher Brände in Großversuchen zu simulieren. Bild 4.6.3, auszugsweise aus [1], zeigt die Ergebnisse britischer Brandversuche. In einem Brandraum bestimmter Größe und Ventilationsbedingung sowie mit bestimmten thermischen Eigenschaften wurden Holzkrippen unterschiedlicher Brandlast verbrannt. Der Größtwert der Brandraumtemperatur nimmt mit der Brandlast und im allgemeinen mit Abnahme der Ventilationsöffnung zu (Hitzestau). Anstieg und Verlauf der Brandraumtemperatur werden von Brandlast und Ventilation deutlich beeinflusst. Hieraus kann man folgern, daß die Temperaturentwicklung in Brandzonen natürlicher Brände sowohl von zahlreichen geometrischen, thermischen und strömungsmechanischen Parametern des Brandraums als auch von Art, Masse, Verteilung und Heizwert der brennbaren Stoffe abhängen muß.

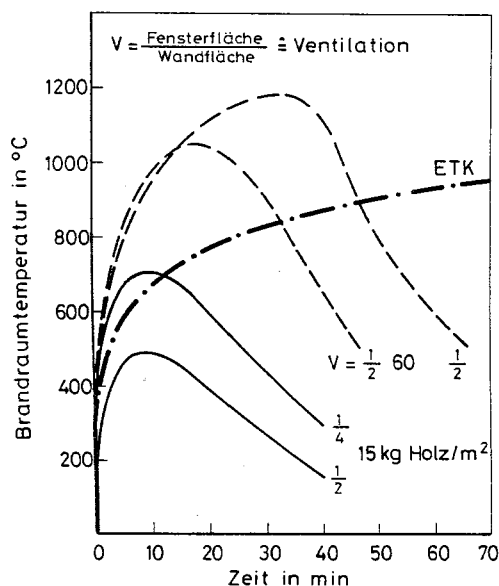


Bild 4.6.3 Temperatur-Zeitverläufe bei Holzkrippen-Bränden in britischen Laborversuchen (auszugsweise aus [1])

Die Prognose der mannigfaltigen, denkbaren Temperaturverläufe natürlicher Brände ist Gegenstand laufender Forschung. In [N 2] wird bereits versucht, den Temperaturverlauf des möglichen natürlichen Brandes in Industriegebäuden abzuschätzen. Zur Beurteilung und Prüfung des Brandverhaltens von Bauteilen hat man sich entschlossen, von einer Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) für die Temperaturentwicklung im Brandraum auszugehen; sie ist aufgrund internationaler Vereinbarungen festgelegt worden (s. Bild 4.6.4). Die Feuerwiderstandsklassen von DIN 4102 Teil 2 sind im Zusammenhang mit der ETK zu verstehen, die in Bild 4.6.3 vergleichshalber eingetragen ist.

#### 4.6.4.3 Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102

Die Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen wie Wände, Decken, Stützen, Unterzüge, Treppen u. a. nach DIN 4102 Teil 2 ist die Mindestdauer, während der das Bauteil einer Temperaturbeanspruchung nach ETK gemäß Anforderungen standhält. Das Bauteil ist dabei den Gebrauchslasten ausgesetzt sowie praxisgerecht gestützt und eingebaut. Die Tabelle 4.6.2 zeigt die Feuerwiderstandsklassen.

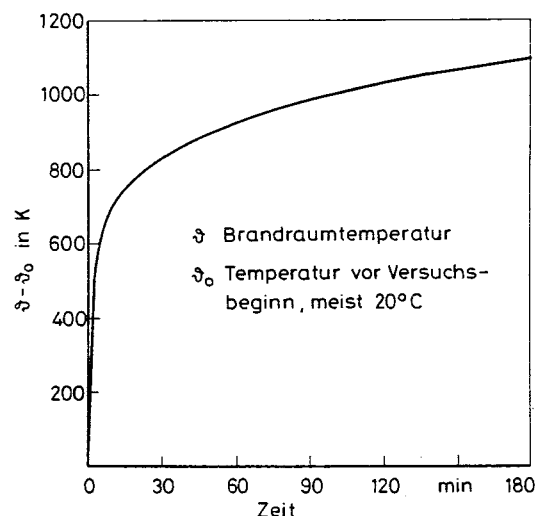


Bild 4.6.4 Einheits-Temperaturzeitkurve ETK

Die Einstufung eines Bauteils in eine Feuerwiderstandsklasse kann auf verschiedene Weise erfolgen:

- Entspricht ein gewähltes Bauteil hinsichtlich Stoff, Querschnitt, konstruktiver Durchbildung und anderes mehr einem klassifizierten nach DIN 4102, Teil 4 (Standard-, Regellösung), so ist die Einstufung problemlos.
- In allen anderen Fällen ist der Brandversuch erforderlich. Gegebenenfalls ist eine Einstufung auf der Basis von Erfahrungen möglich.
- Die rechnerische Vorhersage »Tragfähigkeit von Bauteilen im Brandfall« ist Gegenstand laufender Forschung und wird in der Zukunft möglich sein.

Neben der Feuerwiderstandsklasse erhalten die Bauteile noch eine zusätzliche Benennung nach der Baustoffklasse der wesentlichen Teile. Es bedeutet z. B. F 90-A: F 90 mit nichtbrennbarem Baustoff.

Bauteile mit Sonderanforderungen wie Brandwände, Feuer-schutzabschlüsse, Verglasungen u. a. werden in den Teilen 3, 5 bis 7 von DIN 4102 geregelt.

Tab. 4.6.2 Feuerwiderstandsklassen

Feuerwiderstandsklasse	Feuerwiderstandsdauer in Minuten
F 30	≥ 30
F 60	≥ 60
F 90	≥ 90
F 120	≥ 120
F 180	≥ 180

Die Prüfung des Brandverhaltens eines Bauteils nach Norm hat modellhaften Charakter und kann dessen Verhalten im Bauwerk bei einem realen Brand nur unvollkommen widerspiegeln. Neben dem Unterschied zwischen dem Temperaturverlauf eines natürlichen Brandes und der ETK gibt es auch Unterschiede hinsichtlich Stützung und Belastung usw. Die neuere Forschung befaßt sich deshalb neben dem Verhalten des einzelnen Bauteils zunehmend mit dessen Wechselwirkung mit der Gesamtkonstruktion.

#### 4.6.4.4 Einflüsse auf das Bauteilverhalten

##### Vorbemerkungen

Das Brandverhalten eines Bauteils hängt sowohl im realen Brand als auch beim Normbrand von zahlreichen Einflüssen ab, die vereinfachend zwei Gruppen zugeordnet werden können. Die eine Gruppe umfaßt jene Einflüsse, die die Entstehung und Vollentwicklung des Brandes sowie den Temperaturverlauf in Bauteilnähe bestimmen. Die andere Gruppe, auf die nun eingegangen wird, beinhaltet jene Einflüsse, die vom Bauteil selbst herrühren. Selbstverständlich bestehen zwischen beiden Gruppen Wechselbeziehungen.

Die zweite Gruppe umfaßt folgende Einflüsse:

- Hochtemperaturverhalten der Baustoffe,
- Statisches System,
- Querschnittseinflüsse, Temperaturverteilung,
- Ausnutzung und Beanspruchungsart,
- Bekleidungen u. a.

Auf diese Einflüsse wird im folgenden eingegangen.

##### Hochtemperaturverhalten von Stahl und Beton

###### a) Verhalten der Bau- und Bewehrungsstähle

Durch hohe Temperaturen nehmen der E-Modul, die Streckgrenze  $\beta_S$  und die Zugfestigkeit ab, während die Bruchdehnung zunimmt. Bild 4.6.5 zeigt den Abfall der Streckgrenze und des E-Moduls mit steigender Temperatur für naturharten Baustahl beliebiger Ausgangsfestigkeit [6]. Ungeschützte Stahlbauteile werden wegen der hohen Wärmeleitfähigkeit von Stahl rasch erwärmt.

Die Bilder 4.6.6 und 4.6.7 zeigen das Verhalten einiger Beton- und Spannstahlsorten (aus DIN 4102, Teil 4). Der Abfall der Festigkeitswerte ist um so ausgeprägter, je höher die Ausgangsfestigkeit ist. Dies gilt u. a. dann, wenn die Ausgangsfestigkeit durch Kaltverformung erzeugt worden war. Naturharte und vergütete Stähle weisen nach einer Aufheizung ohne Last im erkalteten Zustand wieder die Ausgangswerte auf. Kaltverformte Stähle hingegen werden durch Aufheizung infolge Rekristallisation bleibend entfestigt (Näheres und Literaturhinweise s. in [1]). Diese Tatsa-

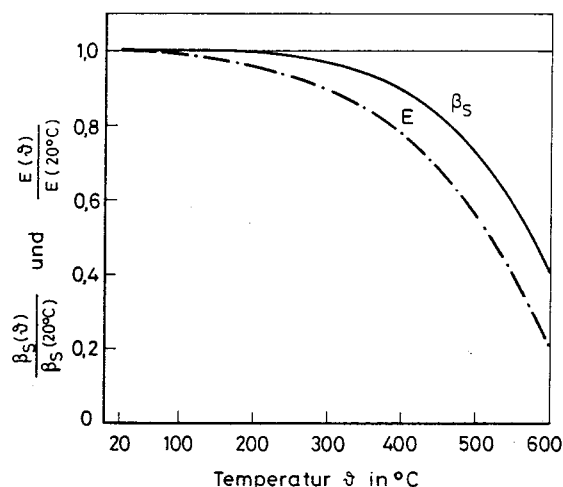


Bild 4.6.5 Abfall der Streckgrenze und des E-Moduls von Baustahl abhängig von der Temperatur

che ist für die Beurteilung der Resttragfähigkeit brandgeschädigter Bauteile von Bedeutung.

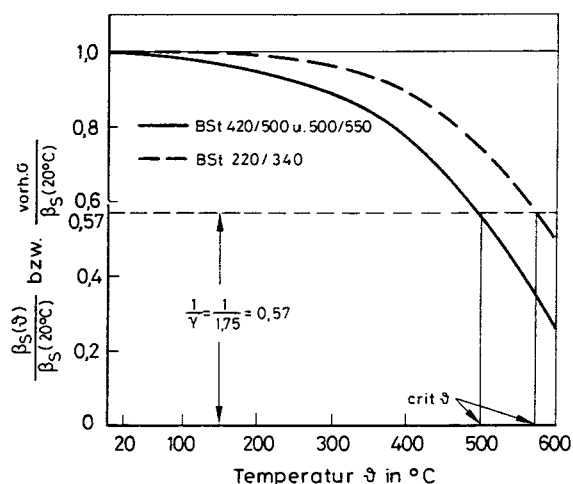


Bild 4.6.6 Abfall der Streckgrenze von Betonstählen abhängig von der Temperatur

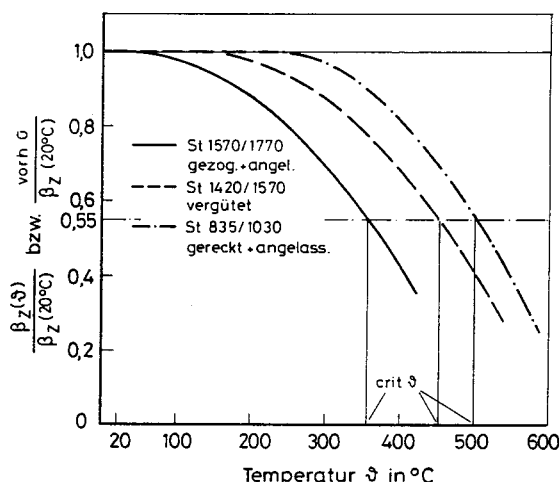


Bild 4.6.7 Abfall der Zugfestigkeit einiger Spannstahlsorten abhängig von der Temperatur

Im Gebrauchszustand ist der Betonstahl in einem Stahlbetonbauteil mit der Gebrauchsspannung  $\sigma_{vorh}$  beansprucht, die mit der Streckgrenze  $\beta_S(20^\circ\text{C})$  über den Sicherheitsbeiwert verknüpft ist:

$$\sigma_{vorh} \leq \frac{\beta_S(20^\circ\text{C})}{\gamma} = \frac{1}{1,75} \beta_S(20^\circ\text{C}) = 0,57 \beta_S(20^\circ\text{C})$$

Sinkt also die Streckgrenze infolge Temperaturerhöhung gerade auf die vorhandene Gebrauchsspannung  $\beta_S(\theta) \leq \sigma_{vorh}$  ab, so fließt die Bewehrung, und es tritt Bauteilversagen ein. Bild 4.6.6 zeigt, daß dieser Zustand bei BSt 420/500 und BSt 500/550 bei einer kritischen Temperatur von rd. 500 °C eintritt. Spannstähle besitzen eine noch niedrigere kritische Temperatur. Zu welchem Zeitpunkt dieser Zustand im nach ETK erwärmten Bauteil eintritt, hängt von der Betonüberdeckung, der Querschnittsform und -größe und von anderen Parametern ab.

###### b) Verhalten von Beton

Das Festigkeits- und Verformungsverhalten von Normal- und Leichtbeton ist sowohl bei stationären als auch bei den

zeitveränderlichen Temperaturen des Brandfalls eingehend erforscht worden ([1] und [9] zeigen den Stand der Kenntnisse auf). Mit zunehmender Temperatur setzen nach der Austrocknung Zersetzungen und Phasenumwandlungen im Zementstein und Zuschlag ein, die zu einer allmählichen Entfestigung des Betons führen.

In Bild 5.7.54 ist die Veränderung des Spannungs-Dehnungs-Diagramms von Beton auf mittigen Druck infolge erhöhter Temperatur dargestellt. Wie Bild 4.6.8 zeigt, nimmt die Druckfestigkeit ab rd. 200 °C progressiv ab. Eine während der Aufheizung wirkende Dauerspannung verzögert die Entfestigung. Die Zugfestigkeit und der Druck-E-Modul fallen mit steigender Temperatur sogar noch deutlicher ab. Die nach vorangegangener Erwärmung bei Wiedererkalten auf Raumtemperatur bestimmte Restfestigkeit ist geringer als die Heißdruckfestigkeit (Bild 5.7.42). Das Verhalten wird durch zahlreiche Parameter beeinflusst (s. [1] und [9]).

Die thermischen Dehnungen bei erhöhter Temperatur hängen, wie Bild 5.7.61 zeigt, nachhaltig vom Zuschlag ab. Die kritische Temperatur, bei der die Gebrauchsspannung vorh  $\sigma \approx 0,30$  bis  $0,40 \beta_c$  der Heißdruckfestigkeit entspricht, liegt bei Beton um rd. 700 °C. Sie übertrifft damit die anderer, nichtbrennbarer Baustoffe beträchtlich.

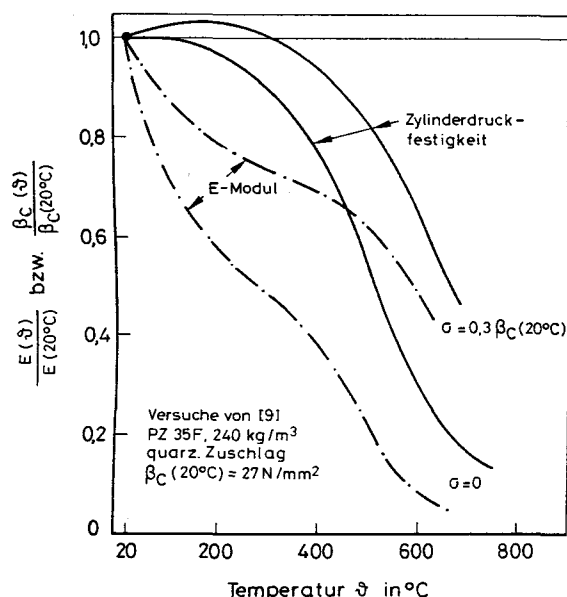


Bild 4.6.8 Abfall der Heißdruckfestigkeit und des Druck-E-Moduls von Beton abhängig von der Temperatur und Vorlast

#### Einfluß des Systems

Die Tragfähigkeit eines Bauteils im Brandfall wird neben den Querschnittsabmessungen, dem Ausnutzungsgrad u.a. durch das statische System bzw. durch dessen Grad der statischen Unbestimmtheit beeinflusst. Statisch unbestimmt gestützte Balken und Decken aus Stahlbeton besitzen meist einen höheren Feuerwiderstand als statisch bestimmte, weil eine Umlagerung der Schnittkräfte ermöglicht wird [1].

Werden jedoch gedrungene Stützen vollständig an ihren Enden behindert, die freie thermische Ausdehnung auszuführen, so führt dies zu einem früheren Versagen als bei freier unbehinderter Dehnung [2]. Durch die Dehnbehinderung entsteht eine Zwangsdruckkraft, die die Ausbiegung verstärkt.

Als Ausnutzungsgrad ist das Verhältnis vorhandene Randspannung/maßgebender Festigkeitswert zu verstehen. Je höher ein Bauteil im Gebrauchszustand ausgenutzt ist, um so geringer fällt sein Feuerwiderstand aus.

#### Temperaturverteilung im Bauteil

Zur Beurteilung des Brandverhaltens eines Bauteils bestimmter Abmessungen und aus einem vorgegebenen Stoff ist die Kenntnis der Temperaturverteilung im Bauteilinneren wichtig. Die Temperaturverteilung im Inneren hängt neben anderen im wesentlichen von thermischen Stoffwerten und geometrischen Größen ab. Die Stromdichte der eindringenden Wärme, also die Wärmemenge je Zeiteinheit, wird durch die Temperaturleitzahl  $a$  bestimmt, die von der Stoffröhdichte  $\rho$ , der spezifischen Wärmekapazität  $c$  und von der Wärmeleitzahl  $\lambda$  abhängt (s. Abschnitt 4.2):

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad [\text{m}^2/\text{s}]$$

Die Temperaturleitzahl ist temperaturabhängig. Bild 4.6.9 [1] zeigt für Beton die Abnahme von  $a$  mit zunehmender Temperatur und den Einfluß der Feuchte. Mit Abnahme von  $a$  verlangsamt sich auch die Erwärmungsgeschwindigkeit. Die Temperaturleitzahl von Stahl ist rd. 7 bis 8 mal größer als die von Beton und führt zur raschen Durchwärmung ungeschützter Stahlprofile.

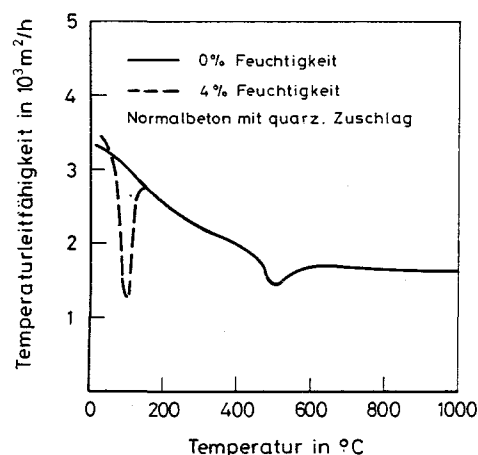
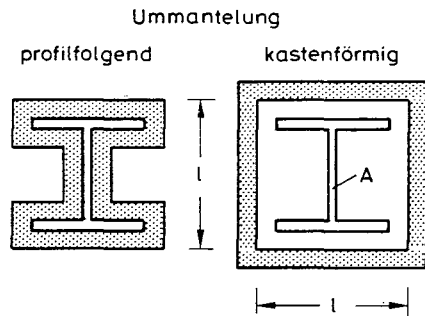


Bild 4.6.9 Temperaturleitfähigkeit von Normalbeton abhängig von der Temperatur [1]

Der Einfluß der Bauteilgeometrie auf das zeitveränderliche Temperaturfeld wird durch das Verhältnis beflamte Oberfläche/Volumen des Bauteils beschrieben. Dieses Verhältnis wird bei einer Bauteillänge von 1 m zum Verhältnis Umfang/Bauteilquerschnitt, das man als Profilkfaktor bezeichnet. Der Profilkfaktor wird zur Beurteilung der Feuerwiderstandsdauer geschützter und ungeschützter Stahlprofile benutzt. Bild 4.6.10 zeigt, wie man hierbei bei vierseitiger Beflammung definiert (Näheres s. DIN 4102 Teil 4). Der Feuerwiderstand nimmt mit Abnahme des Profilkfaktors zu.

Für Betonbauteile wird der Profilkfaktor als Beurteilungsgröße nicht benutzt, weil damit der wichtige Einfluß des Abstands der Bewehrung von der beflamten Seitenfläche auf den Feuerwiderstand nicht erfaßt wird. Gleichwohl bestimmt er die Temperaturverteilung im Betonbauteil; die

Stahleinlagen üben auf diese keinen Einfluß aus. Die Temperatur in einem Betonbauteil kann mit Kenntnis der Temperaturleitzahl und der Lufttemperatur in Bauteilnähe berechnet werden [1].



$$\frac{U}{A} = \frac{\text{Profilabwicklung}}{A}$$

$$\frac{U}{A} = \frac{4l}{A}$$

Bild 4.6.10 Profilfaktor nach DIN 4102, Beispiele (allseitige Beflammung)

Bild 4.6.11 zeigt die Temperaturverteilung in einer einseitig beflaminten Decke oder Scheibe zu verschiedenen Zeitpunkten bzw. Branddauern bei Erwärmung nach ETK [1]. Hieraus kann man für einen Bewehrungsstab bestimmten Durchmessers und Betondeckung die in Stabmitte herrschende Temperatur ablesen und der kritischen Temperatur des Stahls nach Bild 4.6.6 gegenüberstellen. In Bild 4.6.12 ist gezeigt, welche Temperatur in einem Stab  $\varnothing 22$  mm nach 60 min ETK herrscht. Man erkennt, daß die Temperatur in Stabachse der ungestörten Betontemperatur entspricht. Die Stabmittentemperatur wird also im wesentlichen vom Abstand des Stabes von der beflaminten Seite bestimmt. Damit kann man die Feuerwiderstandsdauer von Stahlbetonbauteilen durch Wahl der Betonabmessungen und des Stababstandes beeinflussen (s. klassifizierte Bauteile nach DIN 4102 Teil 4).

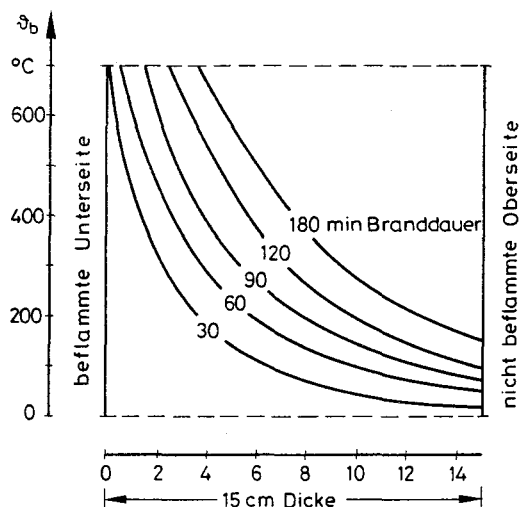


Bild 4.6.11 Temperaturverteilung in einer einseitig nach ETK beflaminten Decke oder Scheibe aus Normalbeton (aus [1]), abhängig von der Branddauer

#### Bekleidungen

Durch Bekleidungen aus nichtbrennbaren und gleichzeitig wärmedämmenden Baustoffen (Putze, Gipskarton-Platten, Asbestzementplatten, Unterdecken) kann die Feuerwider-

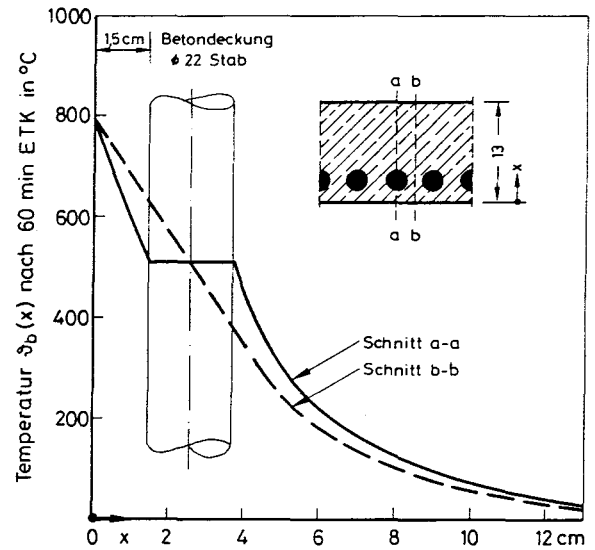


Bild 4.6.12 Verlauf der Temperatur in einer von unten beflaminten Stahlbetonplatte nach 60 min ETK [1]

standsdauer von Bauteilen aus nichtbrennbaren und brennbaren Baustoffen gesteigert werden. Bild 4.6.10 zeigt Beispiele für Stahl. Durch im Brandfall aufschäumende Dämmschichtbildner kann die Feuerwiderstandsklasse F 30 für übliche Stahlbauteile erreicht werden. Näheres s. in [1] und [2].

#### 4.6.5 Vorschriften und Richtlinien

- [N 1] DIN 4102. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, 8 Teile, herausgegeben zwischen 1977 und 1981.
- [N 2] DIN 18230. Baulicher Brandschutz im Industriebau. Entwurf, 2 Teile, 8/1978.

#### 4.6.6 Literatur

- [1] Kordina, K. und C. Meyer-Ottens: Beton-Brandschutz-Handbuch. Beton-Verlag, 1981.
- [2] Knublauch, E.: Einführung in den baulichen Brandschutz. Werner Ingenieur Texte WIT 59, Werner-Verlag, 1978.
- [3] Menges, G.: Werkstoffkunde der Kunststoffe. C. Hanser Verlag, 1979.
- [4] Himmler, K.: Kunststoffe im Bauwesen. Werner Ingenieur Texte WIT 62, Werner-Verlag, 1981.
- [5] Kordina, K., L. Krampf und C. Meyer-Ottens: Das Brandverhalten von Holzbauteilen. Holzbautaschenbuch. Wilh. Ernst & Sohn.
- [6] European Recommendations for the Design of Steel Structures. Exposed to the Standard Fire. European Convention for Constructional Steelwork. July 1979.
- [7] Design of Concrete Structures for Fire Resistance. CEB-Bulletin No. 145, 1982.
- [8] Cluzel, D. und Ch. Hildebrand: Behaviour of plastics used in construction at high temperatures. RILEM 44 PHT, Nov. 1982.
- [9] Schneider, U.: Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen. DAfStb-Heft 337, 1982.

# 5 Überblick über die Baustoffe

## 5.1 Stahl und Eisengußwerkstoffe

### 5.1.1 Einleitung

Stahl ist ebenso wie Holz und Stein ein klassischer Baustoff. Er ist der eigenständige Konstruktionswerkstoff des Stahlbaus und macht außerdem wegen seiner gegenüber Beton vielfach höheren Zugfestigkeit und Duktilität die Verbundwerkstoffe Stahl- und Spannbeton erst möglich.

Stahl ist ein industrielles Produkt in vielen Gestalten, wie Formstahl, ebenes und beliebig kalt geformtes Blech, Rohr, Stab, Draht, Seil u. a. m. Die Palette der für definierte Einsatzgebiete entwickelten Stähle ist sehr groß, ihre Güte ist hoch und gleichmäßig.

Die Vorteile des Stahls gegenüber anderen Konstruktionswerkstoffen liegen in dessen hohem Wirkungsgrad, der als Verhältnis aufnehmbare Last zu Eigengewicht definiert wird, in der guten Anpaßbarkeit der Querschnitts- und Bauteilform an den Kraftfluß und in der leichten Demontier- und Ergänzbarekeit von Konstruktionen. Als Nachteile sind die Korrosionsanfälligkeit normalen Baustahls und sein geringerer Brandwiderstand gegenüber mineralischen Baustoffen zu werten. Neuere Entwicklungen haben den Abbau dieser Nachteile zum Ziel.

Architekten und Bauingenieure, die mit Stahl entwerfen und konstruieren, müssen ihren Werkstoff kennen und verstehen, zumal im Zuge der Herstellung, Formung und des Zusammenfügens im Regelfall Veränderungen des Stahlgefüges eintreten können. Es ist deshalb notwendig, die Grundzüge der Metallkunde, der Stahlherstellung und der Eigenschaftsbeeinflussung zu kennen. Vertiefte Kenntnisse können mit dem Studium der weiterführenden Literatur von Abschnitt 5.1.9 erworben werden.

### 5.1.2 Metallkundliche Grundlagen

#### 5.1.2.1 Kristalle des Eisens und seiner Legierungen

Struktur und Gefüge der metallischen Werkstoffe wurden bereits in Abschnitt 3.3 behandelt. Die für reines Eisen innerhalb bestimmter Temperaturintervalle existierenden Kristallformen  $\alpha$ -Eisen (krz) und  $\gamma$ -Eisen (kfz) zeigt Bild 3.8; sie sind auch die Bauformen der Eisenlegierungen.

Metallische Werkstoffe sind stets Legierungen, die durch das Zusammenschmelzen von mindestens zwei Elementen oder im festen Zustand durch Einwandern von Atomen in ein Wirtsgitter entstehen. Reines Eisen ist technisch bedeutungslos. Die Schmelze enthält stets weitere Elemente, die entweder ungewollt als Verunreinigungen vorhanden sind oder gezielt als Legierungselemente zur Beeinflussung der Stahleigenschaften zugegeben werden.

Durch Einbau von Fremdatomen in das Wirtsgitter des reinen Eisens entstehen Mischkristalle verschiedener Art, die in Bild 5.1.1 dargestellt sind. Die Fremdatome führen zu einer Gitterverspannung (s. Punktfehler Abschnitt 3.3.3).

Beim Substitutionsmischkristall werden Eisenatome durch Fremdatome am Gitterplatz ausgetauscht. Diese vollständige Mischbarkeit ist nur dann möglich, wenn das Fremdatom den gleichen Gittertyp besitzt und in seinem Durchmesser nicht wesentlich von dem des Fe-Atoms abweicht. Die Fremdatome sind im allgemeinen regellos verteilt. Beim Ausscheidungshärten wird die gezielte Anhäufung von Fremdatomen an Korngrenzen erzeugt (Versetzungsblokierung zur Verfestigung).

Bei den Einlagerungsmischkristallen werden nichtmetallische Fremdatome kleineren Durchmessers auf Zwischen-gitterplätzen gelagert. Im kfz-Gitter ist hierfür Platz in Würfelmitte vorhanden. Kohlenstoff ist das wichtigste Element zur Bildung von Einlagerungs-MK. Daneben sind auch Kombinationen von Substitutions- und Einlagerungs-MK möglich. Bei der Verfestigung von Stählen mit Hilfe bestimmter Elemente wie Titan, Wolfram, Vanadium u. a. entstehen sehr harte Karbide, die als interstitielle Phasen eingelagert werden.

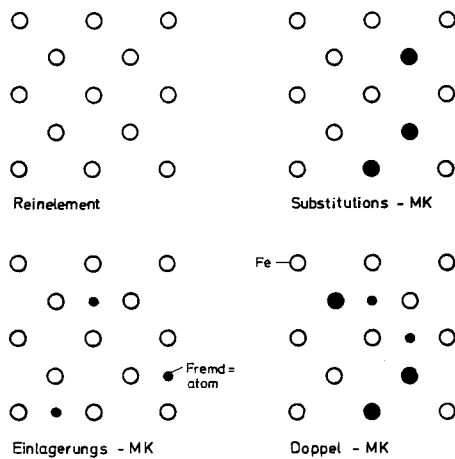


Bild 5.1.1 Mischkristalle der Eisenlegierungen

### 5.1.2.2 Vorgänge beim Erstarren und Schmelzen

#### Phasen und Phasenumwandlungen des Reinetalls

Ein Eisenwerkstoff entsteht durch Erstarren aus der Schmelze. Beim Abkühlen aus der Schmelze tritt eine Reihe von Zustandsänderungen (Phasenumwandlungen) auf, die in Bild 5.1.2 für ein reines Metall dargestellt sind.

Die Schmelze ist homogen und stellt die flüssige Phase L dar. Die Primärkristallisation (Guß- oder Primärgefüge) setzt an der Kristallisationstemperatur ein. Hierzu sind Keime als Zentren des Kristallwachstums erforderlich, die in technischen Schmelzen als Fremdkeime (z.B. feste Partikel aus Verunreinigungen) stets vorhanden sind. Reine Metallschmelzen müssen zur Aktivierung der Eigenkeimbildung unterkühlt werden.

Bei der Kristallisation wird ein Temperaturhalt während eines Zeitabschnitts beobachtet, in dem Schmelze und Kristalle als Gemisch zweier Phasen L + K nebeneinander existieren. Erst nach vollständiger Phasenumwandlung in den festen Zustand S ist eine weitere Abkühlung möglich. Die Halte- und Knickpunkte der Temperatur-Zeit-Kurve signalisieren Zustandsänderungen, Änderungen des Wärmehalts, Volumenänderungen und Änderungen physikalischer Eigenschaften.

Bei Erwärmung laufen diese Änderungen reversibel ab. Bild 5.1.3 zeigt die Vorgänge beim reinen Eisen, die mit einigen Kristallumwandlungen verbunden sind (Allotropie).

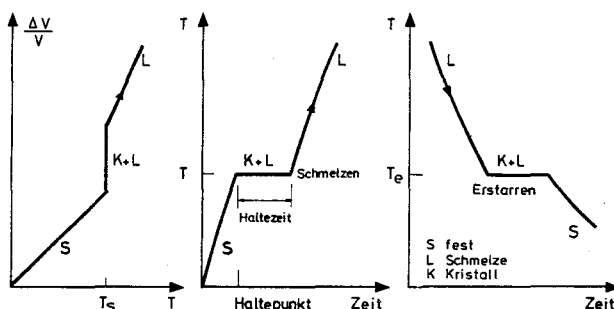


Bild 5.1.2 Schmelzen und Erstarren beim metallischen Einstoffssystem

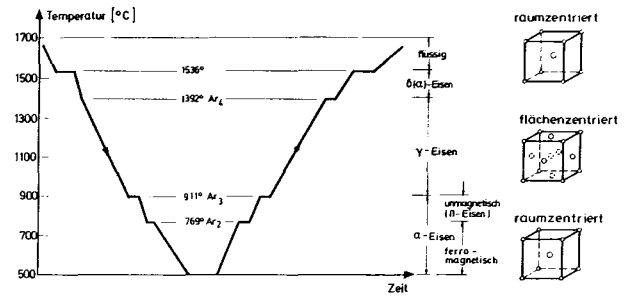


Bild 5.1.3 Abkühlungs- und Erhitzungskurve von reinem Eisen und zugehörige Raumgitter

#### Phasenumwandlungen bei Legierungen

Der Zustand einer Legierung, z. B. aus zwei Komponenten A und B, wird durch die Zustandsgrößen

Temperatur T

Druck p

Konzentration c der Komponenten

beschrieben. Da die technischen Prozesse bei Normaldruck durchgeführt werden, wird ein Zustand durch T und c eindeutig bestimmt. Die Konzentrationen sind die Masseanteile von A und B, die in Masseprozent angegeben werden:  $m_A, m_B; m_A + m_B = 100 \text{ M-\%}$ .

Änderungen des Zustands kann man mit dem Phasengesetz von Gibbs angeben:

$$F = K + 1 - P$$

Hierin bedeuten:

K Anzahl der Komponenten

P Anzahl der Phasen

F Anzahl der Freiheitsgrade bzw. die Anzahl der Zustandsgrößen (T und c), die unabhängig voneinander verändert werden dürfen, ohne daß sich die Anzahl der Phasen (Zustand) ändert.

Die Phasenregel soll zunächst am Einstoffsystem vorgeführt werden. Hier gilt wegen:

$$F = 1 + 1 - P = 2 - P$$

in der Schmelze und im festen Zustand:

$$F = 1$$

Dies bedeutet, daß – da  $c = \text{const.}$  – die Temperatur beliebig veränderbar ist. Beim Phasengemisch L + K während des Erstarrens ist mit  $P = 2$

$$F = 0.$$

Damit ist gezeigt worden, daß beim Zustand »Schmelze + Kristalle die Temperatur einen festen Wert, nämlich die Kristallisationstemperatur  $T_e$ , besitzen muß.

Beim Zweistoffsystem gilt:

$$F = 2 + 1 - P = 3 - P$$

Im schmelzflüssigen Zustand können also Temperatur und Konzentration verändert werden, ohne daß sich der Zustand »Schmelze« ändert. Während des Erstarrens ist wegen  $L + K = P = 2$  der Freiheitsgrad 1. Damit tritt beim Zweistoffsystem keine konstante Kristallisationstemperatur, sondern

ein Kristallisationsintervall mit fallender Temperatur auf. Ob im festen Zustand des Zweistoffsystems nur eine oder zwei Phasen existieren, hängt von der Löslichkeit der Komponenten im festen Zustand ab. Hierüber wird im folgenden gesprochen.

In der Schmelze sind die Komponenten vollständig ineinander gelöst. Bei Abkühlung in den festen Zustand ist eine vollständige Löslichkeit nur dann gegeben, wenn die Voraussetzungen zur Bildung von Substitutions-MK erfüllt sind, also eine homogene Mischkristallphase entsteht. Sind hingegen die beiden Komponenten im festen Zustand ineinander vollständig unlöslich, so entsteht ein zweiphasiges Kristallgemisch. Neben diesen Grundtypen der Löslichkeit gibt es Kombinationen aus beiden mit teilweiser Löslichkeit.

### Zustandsschaubild

Die Zustandsänderungen beim Erstarren bzw. Schmelzen einer Legierung können im Zustandsschaubild, auch Phasendiagramm genannt, dargestellt werden. Die Entstehung eines Zustandsschaubilds wird beispielhaft für die Kupfer-Nickel-Legierung, die mit vollständiger Löslichkeit erstarzt, vorgeführt. Diese Elemente erfüllen die erforderlichen Bedingungen der vollständigen Löslichkeit im festen Zustand.

#### a) Zustandsschaubild bei vollständiger Löslichkeit

Verfolgt man die Temperatur-Zeit-Linien der Abkühlung von Schmelzen aus Cu und Ni, so stellt man Knickpunkte des Erstarrungsbeginns und -endes fest, deren Lage vom Mischungsverhältnis abhängt, s. Bild 5.1.4. Durch Verbinden der Knickpunkte über dem Mischungsverhältnis als Abszisse erhält man das Zustandsschaubild der Kupfer-Nickel-Legierung. Unterhalb der Solidus-Linie liegt eine homogene Phase aus Substitutions-MK vor. Die MK besitzen ebenso wie die Partner ein kfz-Gitter, dessen Plätze im Verhältnis der Anteile von Cu- und Ni-Atomen besetzt sind.

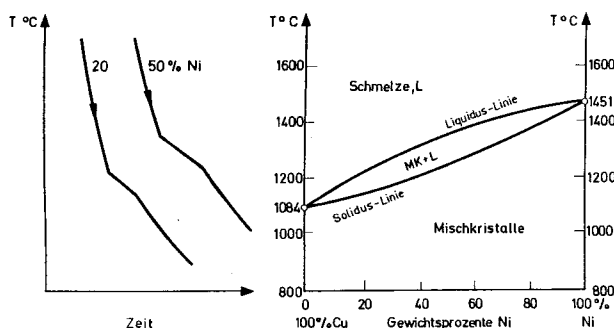


Bild 5.1.4 Zustandsschaubild für vollständige Löslichkeit im flüssigen und festen Zustand

#### b) Zustandsschaubild bei vollständiger Unlöslichkeit

Bei einer Cadmium-Wismut-Legierung z.B. entstehen nebeneinander Cadmium- und Wismutkristalle, s. Bild 5.1.5. Die Gittertypen sind völlig unterschiedlich: Cd-hexagonal, Bi-rhomboedrisch. Damit ist eine Mischkristallbildung ausgeschlossen. Die Liquidus-Linie zeigt einen V-förmigen Verlauf, die Solidus-Linie verläuft horizontal. Die L-Linie und S-Linie treffen am Punkt E zusammen. Dieser Punkt markiert die eutektische Zusammensetzung, hier

40% Cd und 60% Bi. Diese Legierung erstarrt wie ein Einstoffsystem mit Temperaturhalt zu einem Kristallgemisch, das man Eutektikum nennt und das ein feinkörniges Gefüge aufweist.

Jede andere Zusammensetzung als die eutektische führt zu Kristallgemischen aus Eutektikum und eingebetteten Cd- bzw. Bi-Kristallen.

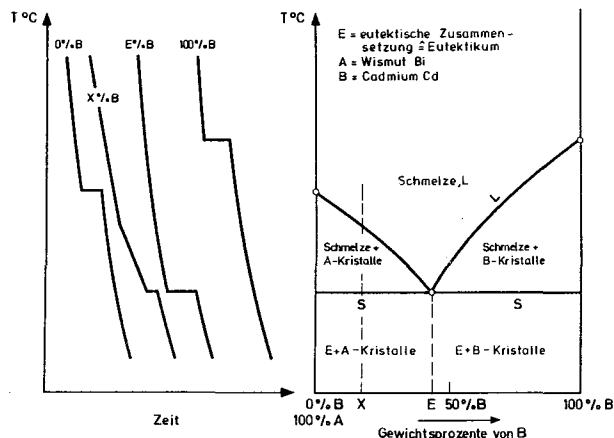


Bild 5.1.5 Zustandsschaubild für vollkommene Unlöslichkeit im festen Zustand

### Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild

Die meisten Baustähle und die Eisengußwerkstoffe stellen Legierungen aus Eisen und Kohlenstoff dar: Kohlenstoff ist ein wirksamer Festigkeitsbildner und das billigste Legierungselement zugleich. Die Zustände dieser Legierung zeigt das Eisen-Kohlenstoffdiagramm EKD, s. Bild 5.1.6. In Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt bilden sich vielfältige Phasen. Auch im festen Zustand finden Phasenumwandlungen statt, wodurch die gezielte Werkstoffbeeinflussung durch Wärmebehandeln (Glühen, Härten, Vergüten) ermöglicht wird.

Das hier gezeigte EKD gilt für rasche Abkühlung, damit sich überschüssiger, also nichtlöslicher Kohlenstoff, nicht als Graphit (reiner C-Kristall) ausscheidet, sondern durch

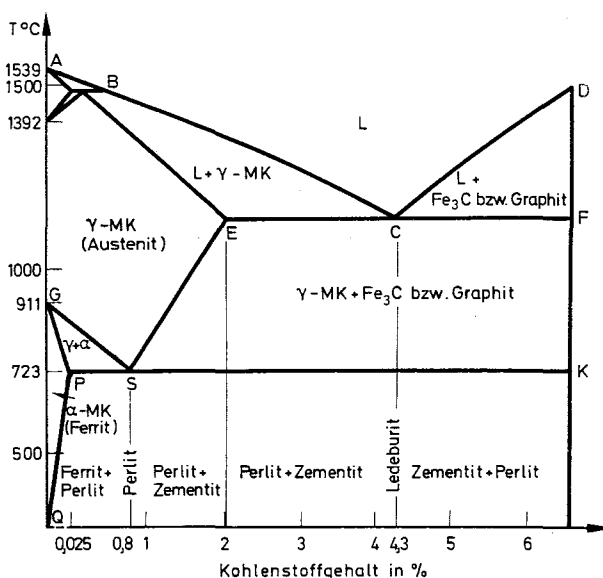


Bild 5.1.6 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (metastabiles System)



Unterkühlung des Eisencarbid  $\text{Fe}_3\text{C}$  mit rd. 7% C-Gehalt bildet. Der Grund hierfür ist: Graphit ist weich,  $\text{Fe}_3\text{C}$  ist hart und bildet Festigkeit. Man spricht von einer metastabilen Erstarrung, die bei langsamer Abkühlung oder Erwärmung zur stabilen Form mit Graphitausscheidung gewandelt wird. Nach dem Kohlenstoffgehalt können die Bereiche Stahl  $\text{C} \leq 2,1\%$  (Grenze der Schmiedbarkeit) und Gußeisen  $\text{C} > 2,1\%$  unterschieden werden.

Bild 5.1.7 zeigt schematisch die Gefügeausbildungen für Stahl. Unterhalb der Solidus-Linie im Bereich  $\text{C} \leq 2,1\%$  entsteht als homogene feste Lösung der Austenit. Bei einem Kohlenstoffgehalt  $\text{C} = 0,8\%$  zerfällt der Austenit, und es bildet sich eine eutektoidale Phase, die man als Perlit bezeichnet. Der Perlit ist ein Kristallgemisch aus den  $\alpha$ -MK des Ferrits und sehr harten, streifenförmigen Eisencarbidkristallen. Das Eisencarbid  $\text{Fe}_3\text{C}$ , Zementit, nimmt den im  $\alpha$ -MK nichtlöslichen Kohlenstoff auf. Bei einem Kohlenstoffgehalt  $\text{C} > 0,8\%$  wird neben dem streifenförmigen Primärzementit an den Korngrenzen der schalenförmige Sekundärzementit ausgeschieden.

Der Bereich des Gußeisens besitzt beim Kohlenstoffgehalt von rd. 4,3% ein Eutektikum, das man Ledeburit nennt und das aus den  $\gamma$ -Mischkristallen des Austenits und fein verteiltem Eisencarbid besteht.

Mit Zunahme des Kohlenstoffgehalts nimmt der Anteil des harten und spröden Zementits und damit die Stahlfestigkeit zu. Dies gilt aber nur bis  $\text{C} \approx 0,8\%$ , denn ab diesem Kohlenstoffgehalt bildet sich zusätzlich der Sekundärzementit, der das Gefüge schwächt. Mit steigendem Kohlenstoffgehalt sinken die Kalt- und Warmverformbarkeit, die Schweißbarkeit und die Zähigkeit des Werkstoffs. Durch Legierungselemente wird das EKD verändert. Gewisse Elemente verengen, andere erweitern das Austenitgebiet und verhindern den Austenitzerfall. Auf die verwickelten Zusammenhänge kann hier nicht näher eingegangen werden.

Gefüge	Bezeichnung	Typ	C-Ge-halt %	Eigenschaften in Stichworten
	Ferrit	$\alpha$ -MK krz	0 bis 0,02	kohlenstoffarm, weich, wenig fest aber zäh, gut verformbar
	Austenit	$\gamma$ -MK kfz	0 bis 2,1	sehr zäh und sehr gut verformbar, nur bei legierten Stählen b. Raumtemp. existent
	Perlit = Ferrit + Zementit	$\alpha$ -MK + Z	0,8	fest und noch gut verformbar, härtbar, nicht schweißbar
	Ferrit + Perlit	$\alpha$ -MK + Z	< 0,8	Gefüge der schweißbaren Baustähle mit $\text{C} \leq 0,3\%$ . Mit C-Gehalt steigt Festigkeit und Härtebarkeit; Versprödung nimmt zu; Verformbarkeit sinkt
	Perlit + Sekundärzementit	$\alpha$ -MK + Z	> 0,8	hart und spröde; Festigkeit und Verformbarkeit sinken

Bild 5.1.7 Gefügetypen von Stahl

### 5.1.2.3 Phasenumwandlungen im festen Zustand

Bereits im vorherigen Abschnitt wurde gezeigt, daß bei Abkühlung und Erwärmung auch im festen Zustand Phasenumwandlungen auftreten. Man unterscheidet hier nach:

#### a) Umwandlungen

Modifikationen der Gitterform mit und ohne Konzentrationsänderung. Beispiel: Wandlung von Austenit in Ferrit + Perlit.

#### b) Ausscheidungen

Stoffausscheidung aus einem Mischkristall, weil die Löslichkeit mit abnehmender Temperatur sinkt. Beispiel: Ausscheiden von Zementit aus Austenit.

Alle Phasenänderungen und chemischen Reaktionen benötigen Zeit und sind mit einer Änderung der inneren Energie verbunden. Betrachtet man z. B. einen kristallinen Stoff bei Abkühlung aus der Schmelze, so ist jede Phasenänderung mit einer Erniedrigung der freien Energie verbunden, da ein Energieminimum angestrebt wird. Um dies zu erreichen, muß durch Zufuhr einer Aktivierungsenergie  $Q$  eine Energiebarriere überwunden werden. Bild 5.1.8 zeigt den Verlauf der freien Energie am Beispiel der Phasenumwandlung im festen Zustand, die in der Regel mit einer Wanderung von Atomen verbunden ist. Dieser Vorgang wird als Diffusion bezeichnet und erfolgt durch Platzwechsel von Atomen (s. Abschnitt 5.1.2.4). Eine anschauliche Erläuterung der Aktivierung erlaubt das mechanische Modell eines kippenden Quaders.

Von großer technischer Bedeutung ist die sog. martensitische Umwandlung, die beim Härten und Vergüten von Stahl bewußt erzwungen wird. Der in Bild 5.1.6 dargestellte Zerfall von Austenit in Perlit kann durch die sehr hohen Abkühlungsgeschwindigkeiten beim Abschrecken (Kühlphase des Härstens) vollständig unterdrückt werden. Dabei wird die Diffusion des Kohlenstoffs aus dem Austenit verhindert, und es entsteht die Kristallart Martensit durch Umklappung bzw. Verzerrung des kfz-Gitters des Austenits in ein tetragonal verzerrtes kfz-Gitter ohne Platzwechsel der Kohlenstoff-

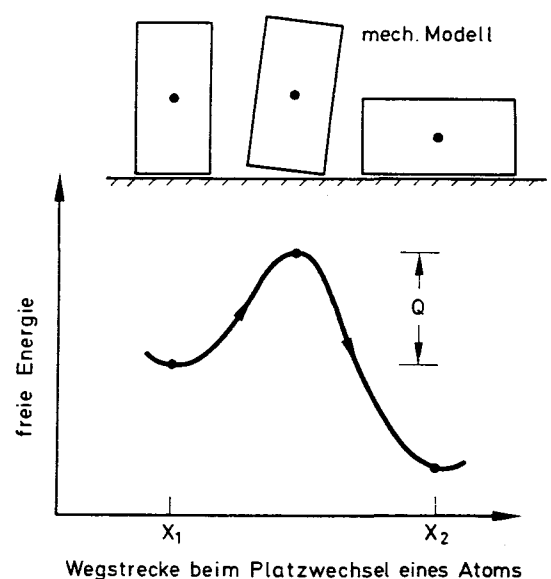


Bild 5.1.8 Aktivierungsenergie  $Q$  beim Platzwechselvorgang und mechanisches Modell

atome, s. Bild 5.1.9. Der Kohlenstoff bleibt zwangsgelöst, was zu einer energiereichen aber wenig stabilen Gitterver-  
spannung führt, die Ursache für die große Härte und hohe  
Festigkeit aber auch für die geringe Verformbarkeit des Mar-  
tensits ist. Das Härtungsgefüge »Martensit« ist feinnadelig  
und wird von dichtstreifigem Perlit umgeben. Durch Wärme-  
zufuhr beim Anlassen wird es wieder teilweise entspannt,  
um eine gewünschte Duktilität zu erzielen.

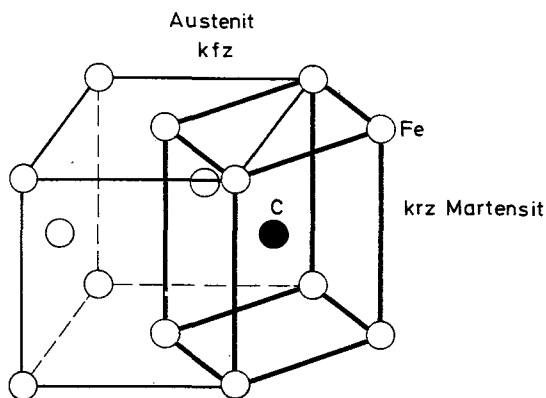


Bild 5.1.9 Entstehung des krz-Martensitgitters

#### 5.1.2.4 Thermisch aktivierte Vorgänge

##### Aktivierung

In der Werkstofftechnik besitzen einige, im festen Stoff  
ablaufende Vorgänge, die durch Temperatur in Gang  
gesetzt werden können, eine große Bedeutung. Dabei han-  
delt es sich um folgende Prozesse: Diffusion, Erholung und  
Rekristallisation, Kornwachstum u. a. mehr. Diesen Prozes-  
sen ist gemeinsam, daß Wanderungen von Atomen und  
Gitterdefekten durch sog. Platzwechselvorgänge stattfin-  
den. Sie können nur ablaufen, wenn dabei die freie Energie  
des Systems erniedrigt wird und wenn sie durch Zufuhr  
einer Aktivierungsenergie in Gang gesetzt werden.

##### Diffusion

Unter Diffusion ist ein Massentransportvorgang zu verste-  
hen, bei dem die Teilchen infolge von Konzentrationsunter-  
schieden im Werkstoff eine gerichtete Bewegung durch  
Platzwechsel ausführen. Die Transportgeschwindigkeit ist  
um so höher, je größer der Konzentrationsunterschied ist,  
der ja ausgeglichen werden soll. Die Platzwechsel finden  
überwiegend an Leerstellen im Gitter statt, weil hierzu die  
geringste Aktivierungsenergie erforderlich ist. Eine gezielte  
technische Anwendung der Diffusion stellt das Aufkohlen  
von Randschichten beim Einsatzhärten dar.

##### Erholung und Rekristallisation

Durch die plastische Kaltverformung eines Werkstoffs wird  
die innere Energie erhöht. Durch Temperaturerhöhung ist  
es möglich, die Versetzungsdichte zu reduzieren. Beim Vor-  
gang der Rekristallisation wird durch Glühen an der Rekri-  
stallisationstemperatur die Verzerrungsenergie der Verset-  
zungen vollständig abgebaut und der Einfluß der Kaltverfor-  
mung auf das Gefüge eliminiert. Die Wärmebehandlung  
beim Erholen erfolgt bei einer niedrigeren Temperatur.  
Dabei werden im wesentlichen Gitterdefekte ausgeheilt und  
umgeordnet, das Gefüge bleibt jedoch verformt.

### 5.1.3 Roheisen- und Stahlerzeugung

#### 5.1.3.1 Roheisenerzeugung

##### Die Rohstoffe

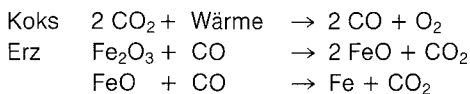
Abgesehen von den Edelmetallen treten alle anderen  
Metalle in der Natur in Form chemischer Verbindungen  
(Oxide, Sulfide, Carbonate) auf. Dabei sind sie mit anderen  
mineralischen Stoffen, Gangart genannt, vermengt. Das  
gesamte Gemenge ist das Erz. Aus Gründen der Wirtschaft-  
lichkeit ist eine Anreicherung der metallischen Verbindun-  
gen erforderlich: Erzaufbereitung z.B. durch Rösten (Aus-  
treiben von  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$ ) und anderes mehr.

##### Roheisenerzeugung im Hochofen

Die Erzeugung von Roheisen erfolgt in der Regel im Hoch-  
ofen (Verhüttung), einem lotrechten, stählernen Schacht-  
ofen, der feuerfest ausgemauert ist (s. Bild 5.1.10). Er wird  
von oben lagenweise mit Erz + Zuschlag (Möller) und Koks  
beschildet. Von unten wird Heißluft (Wind) eingepreßt, das  
Abgas (Gicht) wird oben abgeführt. Der Koks hat folgende  
Aufgaben:

- Brennstoff zur Deckung des Wärmebedarfs
- Reduktionsmittel
- Aufkohlung des Reineisens

So wie unten Roheisen und Schlacke in Intervallen abgesto-  
chen werden, sinkt das Gemenge stetig ab. Im Mittelbereich  
des Hochofens erfolgt die indirekte Reduktion (Entfernen  
von Sauerstoff aus dem Erz) nach folgenden Prozessen:



Im unteren Bereich, der Schmelzzone, findet die direkte  
Reduktion statt:



Gleichzeitig ist es notwendig, das Reineisen zur Erzielung  
technischer Festigkeit wieder aufzukohlen:

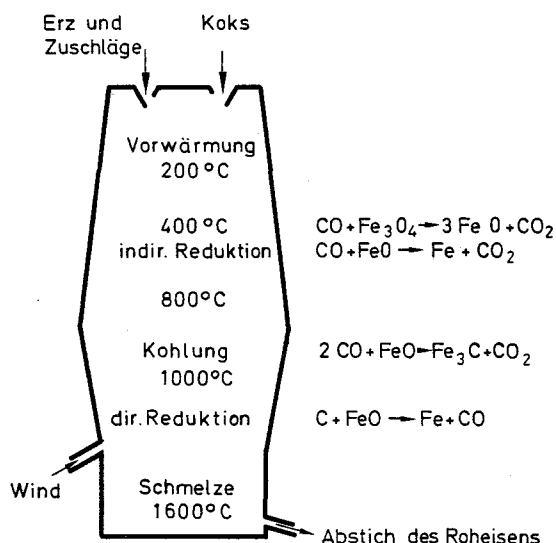
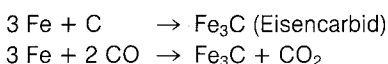


Bild 5.1.10 Hochofenprozeß

Der Zuschlag, Kalkstein oder gebrannter Kalk, hat die Aufgabe als Flußmittel, den Schmelzpunkt des Erzes zu senken und Schwefel zu binden. Die Schmelze aus Zuschlag und Gangart ist die Schlacke, die auf dem erschmolzenen Roheisen im Gestell schwimmt.

Roheisen ist der Ausgangsstoff für die Herstellung von Stahl und Eisenguß (s. Bild 5.1.11). Es enthält neben 2 bis 5% Kohlenstoff außerdem Silizium, Mangan, Phosphor und Schwefel. Die angestrebte Zusammensetzung ist von der Weiterverwendung abhängig (s. Bild 5.1.12).

Die Schlacke besteht aus Siliziumdioxid, Tonerde und Branntkalk. Sie ist Rohstoff für zahlreiche andere Baustoffe (Herstellung von Hüttenzement, Betonzuschlag, Straßenbaustoff) [1].

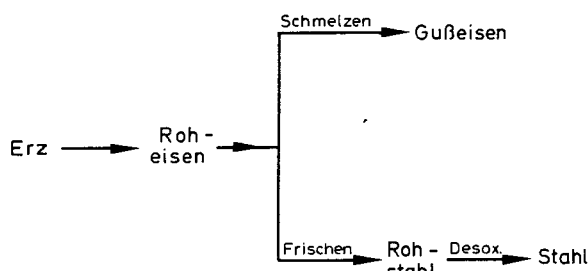


Bild 5.1.11 Roheisen- und Stahlerzeugung

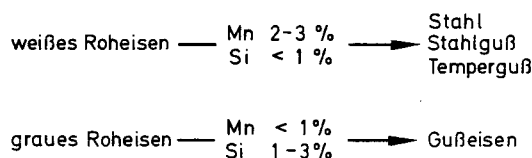


Bild 5.1.12 Arten von Roheisen

### 5.1.3.2 Stahlerzeugung

#### Allgemeines

Roheisen ist wegen seines hohen Gehalts an Kohlenstoff und Phosphor u.a. zu hart und zu spröde sowie nicht schmiedbar. Stahl ist als Fe-C-Legierung definiert, deren Kohlenstoffgehalt weniger als 2% beträgt und die in unlegiertem Zustand schmiedbar ist. Bei der Stahlerzeugung müssen deshalb der Kohlenstoff auf einen gewünschten Wert gebracht und die verspröden Stahlbegleiter Phosphor und Schwefel entfernt werden. Dies erfolgt durch Zufuhr von Sauerstoff (Frischen), der die Überschüsse an Kohlenstoff, Silizium und Mangan (Schlacke) verbrennt. Phosphor wird durch Kalk gebunden, der C-Gehalt durch Stahlwerkslegierungen eingestellt. Die gängigen Verfahren hierzu werden im folgenden besprochen.

#### Thomas-Verfahren (Windfrischen)

Das Thomas-Verfahren benutzt ein birnenförmiges und kippbare Stahlgefäß (Konverter), das mit basischem Dolomit ausgemauert ist. Gefrischt wird mit Luft, die vom Boden her durch das Roheisen geblasen wird. Mit der Luft gelangt aber auch Stickstoff in die Schmelze, der zur Stahlversprödung führt und der den Stahl zum Schweißen ungeeignet macht. Das Thomas-Verfahren ist deshalb fast aufgegeben worden.

#### Sauerstoff-Aufblas-Verfahren

Hierbei wird reiner Sauerstoff über eine Lanze auf das Roheisenbad geblasen. Dieses Verfahren (s. Bild 5.1.13) erlaubt die Einhaltung von sehr niedrigen Stickstoff- und Phosphorgehalten sowie den Einsatz von Schrott. Es ist das bevorzugte Verfahren zur Herstellung von Massenhstählen.

#### Siemens-Martin-Verfahren

Das SM-Verfahren benutzt einen Herdofen großer Oberfläche, aber geringer Tiefe des Schmelzbades, in dem der Stahl durch die Wärme des verbrennenden Kaltgases erschmolzen wird. Das Herdfrischen erfolgt durch den Sauerstoffüberschuß der Heizflamme. Dieses Verfahren erlaubt die Herstellung von Qualitätshstählen (legierte Stähle) und einen hohen Schrotteinsatz.

#### Elektrostahl-Verfahren

Die Schmelzwärme entsteht durch einen elektrischen Lichtbogen, der zwischen Kohleelektroden und dem Einsatz (Inhalt) gezündet wird. Der Ofen ist eine fahr- und kippbare Wanne. Durch die hohe Ofentemperatur und die niedrige Sauerstoffaktivität ist es möglich, Stähle mit hohen Legierungsgehalten (Edelstähle) herzustellen. Das Frischen erfolgt durch Aufblasen von O<sub>2</sub> oder durch Erzzugabe.

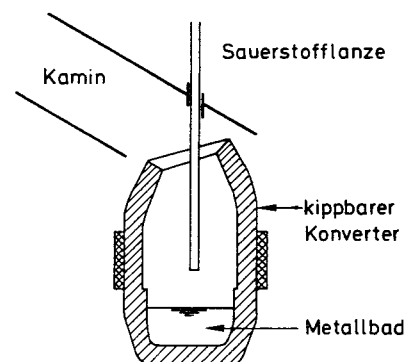


Bild 5.1.13 Konverter des Sauerstoffaufblasverfahrens

#### Desoxidieren, Vergießen und Erstarren des Stahls

Durch das Frischen gelangen Sauerstoff und Stickstoff in die Schmelze, die den Stahl rotbrüchig und alterungsanfällig machen. Der Sauerstoff liegt dabei als FeO vor. Der Entzug von Sauerstoff wird Desoxidation genannt; er erfolgt durch Zugabe von Elementen großer Affinität zu Sauerstoff; wie z.B. Aluminium und Silizium. Die Entschwefelung erfolgt durch Manganzugabe.

Das Vergießen der Stahlschmelze erfolgt entweder nach dem Strangguß- oder dem Kokillengußverfahren. Der Strangguß ist ein Endlosguß, bei dem die Schmelze eine Kühlkokille durchläuft und dabei zum festen Zustand erstarrt. Beim Kokillenguß (Blockguß) wird die Schmelze in dickwandige Gußformen gegossen. Der Block ist das Vorprodukt für die weitere Warmumformung im Walzwerk.

Das Erstarrungsverhalten des Stahls in der Kokille wird vom Grad der Desoxidation beeinflusst. Stahl, dem vor dem Vergießen keine Desoxidationsmittel beigegeben wurden, erstarrt unter Gasentwicklung und unruhig: Unberuhigter Stahl (Kennzeichen U). Die Gasentwicklung wird durch die Desoxidationsmittel Silizium und Mangan verhindert: Beruhigter Stahl (Kennzeichen R).

Wird neben Silizium und Mangan noch Aluminium zur Sauerstoff- und Stickstoffbindung beigegeben, so erhält man besonders zähen und schweißgeeigneten Stahl: Besonders beruhigter Stahl (Kennzeichen RR).

Die Vergießungsart (Desoxidationsgrad) ist von Einfluß auf das Gefüge des Blocks und auf die Verteilung der Begleitelemente. Durch Temperaturunterschiede im Block entstehen Entmischungen, Seigerungen genannt, die beim unberuhigten Stahl als Blockseigerung zu einer Anhäufung von Phosphor und Schwefel im Inneren führt. Bild 5.1.14 zeigt den Vergleich zwischen einem unberuhigt und einem beruhigt vergossenen Block. Durch das Schrumpfen der erstarrenden Schmelze entsteht am Blockkopf ein Hohlraum, Lunker genannt. Der beruhigt vergossene Block zeigt keinen Blasenkranz und eine kleinere Seigerungszone. Seigerungen sind für die Schweißbarkeit von Nachteil. Sie werden mitausgewalzt und befinden sich dann im Inneren der Stege und Flansche von Profilstahl.

Stähle großer Reinheit werden durch die Methoden der Pfannenmetallurgie hergestellt.

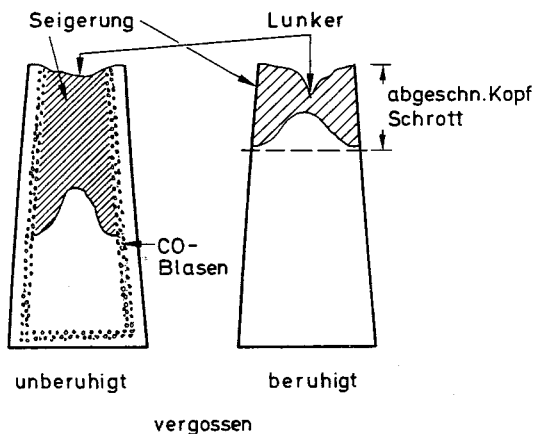


Bild 5.1.14 Gußblöcke im Längsschnitt

## 5.1.4 Beeinflussung der Stahleigenschaften durch die Zusammensetzung, Wärmebehandlung und Umformung

### 5.1.4.1 Zur Wirkung der Stahlbegleiter

Während der Kohlenstoff das wesentliche Legierungselement im Stahl ist, gelangen über das Erz, die Zuschläge, Brennstoffe etc. bei der Roheisen- und Rohstahlerzeugung weitere Elemente in die Schmelze. Diese Elemente, Stahlbegleiter genannt, sind:

- Silizium und Mangan (in kleinen Anteilen erwünscht),
- Phosphor, Schwefel, Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff (in der Regel stets unerwünscht).

Sie üben folgende Wirkungen aus, s. Tab. 5.1.1:

#### a) Silizium

Silizium, auch bewußt zur Desoxidation beigegeben, bildet harte und spröde Silikate, die die Kaltverformbarkeit, Schmiedbarkeit und die Schweißbarkeit mindern.

#### b) Mangan

Mangan wird beim Vergießen zur Bindung von Schwefel und Sauerstoff zugegeben. Es steigert die Festigkeit und die Schweißbarkeit von Baustahl.

#### c) Phosphor

Phosphor vermindert die Zähigkeit und Kaltverformbarkeit von Stahl. Sein Gehalt muß deshalb bei Baustählen unter 0,08% und bei Qualitäts- und Edelstählen unter 0,045% abgesenkt werden.

#### d) Schwefel

Schwefel bildet mit dem Eisen Eisen(II)-Sulfid  $\text{FeS}$ , das sich an den Korngrenzen ablagert und diese schwächt. Es verursacht bei höheren Temperaturen (Schweißung und Warmumformung) die sog. Warm- und Rotbrüchigkeit. Aus diesem Grund wird bei Baustählen der Schwefelgehalt auf  $\leq 0,05\%$  beschränkt. Mangan bindet Schwefel zu Mangansulfid ( $\text{MnS}$ ).

#### e) Sauerstoff

Der Sauerstoff, über das Frischen in die Schmelze gelangend, liegt als Eisenoxid  $\text{FeO}$  vor. Er führt zu Rotbrüchigkeit (Gegenmaßnahme: Desoxidationsmittel).

#### f) Stickstoff

Durch Stickstoff wird zwar die Festigkeit erhöht, aber das Verformungsvermögen und die Kerbschlagzähigkeit reduziert, der Stahl versprödet durch Alterung. Durch Bildung von Eisennitriden bei Erwärmung und Abschreckung kommt es zur Abschreckalterung. Bei Kaltverformung entsteht durch Stickstoffdiffusion die Reckalterung.

#### g) Wasserstoff

Wasserstoff führt ebenfalls zur Versprödung, mit der jedoch eine Festigkeitserhöhung nicht verbunden ist. Das sehr kleine Wasserstoffatom lagert sich mit steigender Temperatur zunehmend an Gitterfehlern ein und übt dort hohen Druck aus. Dieser Druck, verbunden mit hohen räumlichen Spannungen, löst eine Schädigung durch verzögerte Rißbildung aus (Wasserstoffversprödung ist bisweilen Ursache von Spannstahlbrüchen). Wasserstoff kann vorab durch längeres Erwärmen bei rd. 200 °C aus dem Gefüge getrieben werden.

Bei der Stahlherstellung verbleiben unvermeidliche, nichtmetallische Einschlüsse (Oxide, Sulfide, Karbide, Silikate) und Gase in der Schmelze. Durch Desoxidation werden diese CO-Gase weitgehend ausgetrieben; feinverteilte kleine Gasblasen werden aber eingeschlossen. Sie werden bei der Warmumformung verschweißt. Die nichtmetallischen Verunreinigungen stellen Inhomogenitäten und Gefügestörungen dar, die bei Belastung zu Spannungskonzentrationen führen. Einschlüsse beeinflussen deshalb das Festigkeits- und Verformungsverhalten nachhaltig.

Tabelle 5.1.1 enthält eine Übersicht über die Einflüsse der in normalem Baustahl vorhandenen Legierungselemente C, Si und Mn und der schädlichen Stahlbegleiter auf einige wesentliche Eigenschaften.

Tab. 5.1.1 Einflüsse der wesentlichen Legierungselemente und Stahlbegleiter

	C	Si	Mn	P	S	O	N	H
Festigkeit	+	+	+	+	-	o	+	o
Verformbarkeit	-	-	-	-	-	-	o	-
Kerbschlagzähigkeit	-	-	+	-	-	o	-	-
Kaltverformbarkeit	-	-	-	-	-	o	-	-
Warmverformbarkeit	-	-	+	-	-	o	o	o
Schweißbarkeit	-	-	+	-	-	-	-	o

+ erhöhend, verbessernd  
 - verschlechternd, erniedrigend  
 o ohne wesentlichen Einfluß

#### 5.1.4.2 Wärmebehandlung der Stähle

##### Ziel der Wärmebehandlung

Die Wärmebehandlung von Stahl hat zum Ziel, bestimmte Eigenschaften zu verändern oder zu erzielen. Die Wärmebehandlung erfolgt im festen Zustand des Vorprodukts oder fertigen Bauteils und ist mit Diffusionsvorgängen und Strukturumwandlungen verbunden. Die Wärmebehandlungsverfahren

- Glühen
- Härten
- Vergüten

unterscheiden sich nach Höhe der Erwärmungstemperatur, deren Haltedauer und nach der Abkühlgeschwindigkeit bzw. nach weiteren Behandlungen. Bild 5.1.15 zeigt schematisch die Temperaturführung bei der Wärmebehandlung. Bild 5.1.16 zeigt einen Ausschnitt aus dem EKD und die Bereiche der Temperaturen von Wärmebehandlungen.

##### a) Glühen

###### Diffusionsglühen

Es wird zum Ausgleich von Konzentrationsunterschieden der Legierungselemente (Homogenisieren) angewandt (50 h bei 1100 bis 1300 °C).

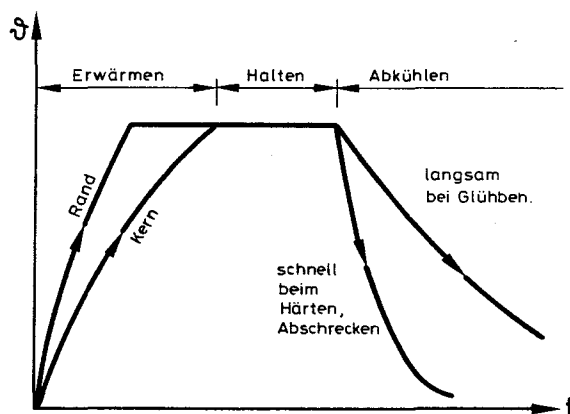


Bild 5.1.15 Temperaturführung bei der Wärmebehandlung

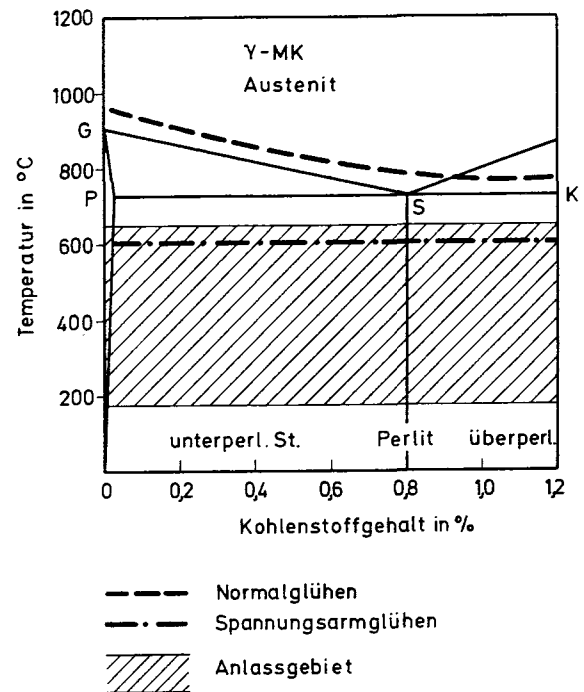


Bild 5.1.16 Ausschnitt aus dem EKD und ungefähre Lage der Halte-temperatur von Wärmebehandlungen von Stahl

##### Grobkornglühen

Es erfolgt im Austenitgebiet und führt zu einem groben, leicht zerspannbaren Gefüge.

##### Normalglühen

Durch das Normalglühen soll ein gleichmäßiges, feinkörniges Normalgefüge erzielt werden, das optimale Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften besitzt. Es lassen sich durch das Gießen, Walzen, Schmieden etc. entstandene Texturen wieder beseitigen. Die unterperlitischen Baustähle ( $C < 0,8\%$ ) erhalten hierdurch ein feineres, ferritisch-perlitisches Gefüge.

##### Spannungsarmglühen

Vorprodukte, fertige Bauteile und Schweißnähte enthalten Eigenspannungen der verschiedensten Ursachen. Diese Vorbeanspruchung kann zu Rissen, zum vorzeitigen Bruch oder zu Verzug führen. Sie muß bei hoch- und besonders bei dynamisch beanspruchten Bauteilen ganz oder wenigstens teilweise eliminiert werden, ohne daß die Festigkeit eine Einbuße erfährt.

##### Eigenspannungen entstehen durch:

- behinderte Schrumpfung von Randzonen beim Abkühlen (z. B. beim Härten),
- Behinderung von Volumenänderungen bei temperaturbedingten Umwandlungen ( $\gamma \rightarrow \alpha$ -U.),
- Kaltverformung von Werkstücken mit Plastizierung von Randfasern,
- Behinderung der Schrumpfung der erstarrenden Schweißnaht durch die Fügeteile.

Bild 5.1.17 zeigt die Wirkung von Schweißeigenspannungen in einer V-Naht. Dem Verzug wird in der Praxis durch sinnvolle Schweißfolge und Lage der Fügeteile begegnet.

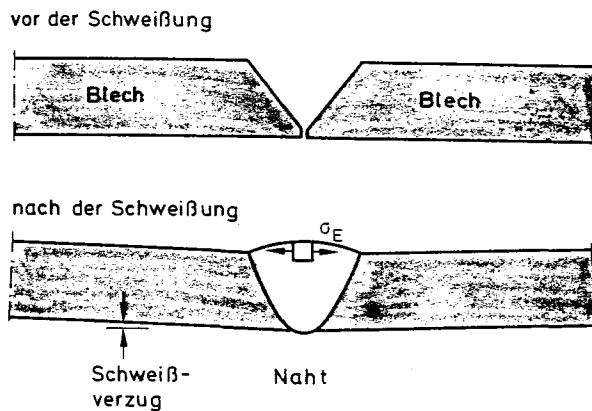


Bild 5.1.17 Schweißbeigenspannungen und Verzug

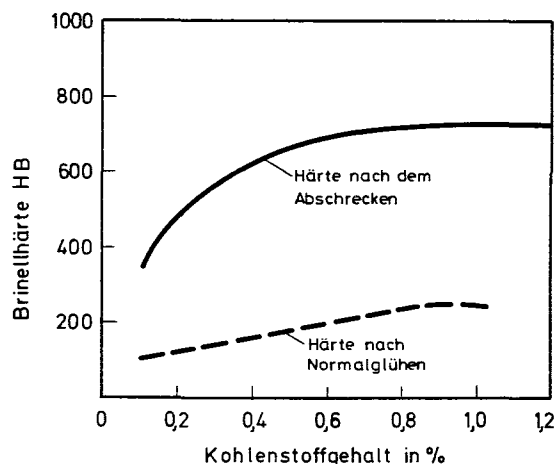


Bild 5.1.18 Brinellhärte in Abhängigkeit von Kohlenstoffgehalt vor und nach dem Abschrecken

#### Rekristallisationsglühen

Durch Kaltverformung nimmt die Festigkeit zu, jedoch die Zähigkeit ab. Will man – bei Verlust von Festigkeit – die Verformbarkeit anheben, so wendet man das Rekristallisationsglühen zwischen 500 und 700 °C an. Dadurch werden die kaltverstreckten Körner wieder gleichachsig.

#### b) Härten

Beim Härten wird der Werkstoff bis über die GSK-Linie des EKD erwärmt, abgeschreckt und anschließend auf niedrigen Temperaturen wieder angelassen. Ziel des Härten ist die Steigerung der Härte, Festigkeit und des Verschleißwiderstands in Kombination mit einer angepaßten Zähigkeit. Anwendungsbeispiel: Lagerplatten und Rollen von Brückenrollenlagern werden gehärtet, um nicht zu verschleifen und abzuplatzen.

#### Abschreckhärten

Während bei langsamer Abkühlung des unterperlitisches Stahls ( $C < 0,8\%$ ) das ferritisch-perlitische Gefüge entsteht, bildet sich beim Abschrecken das nadelige Martensitgefüge (Härtungs-). Martensit entsteht, indem die Umwandlung des  $\gamma$ -Gitters des Austenits (Austenitzerfall) in das engere  $\alpha$ -Gitter bei niedriger Temperatur erfolgt, wodurch ein Platzwechsel von C-Atomen durch Diffusion unterbunden wird. Durch die Verzerrung des Gitters ist der Härteanstieg gegeben, der sich aber nur einstellt, wenn der Kohlenstoffgehalt  $> 0,2\%$  beträgt.

Das Abschrecken erfolgt an Luft oder in Flüssigkeiten (Wasser, Öl, Blei). Das Abschreckmittel richtet sich nach der erforderlichen Abkühlgeschwindigkeit, die die Umwandlungsgeschwindigkeit des Austenitzerfalls übertreffen muß. Die Abkühlgeschwindigkeit ist um so größer zu wählen, je niedriger der Kohlenstoffgehalt ist. Sie ist am größten beim Abschreckmittel Wasser und am kleinsten im Bleibad. Bild 5.1.18 zeigt die Zunahme der Härte in Abhängigkeit vom C-Gehalt.

Das Abschrecken ist mit Härteverzug und Härteeigenspannungen (v.a. bei dicken Werkstücken) verbunden; der Werkstoff ist außerdem glashart und spröde. Das anschließende Anlassen erfolgt an Luft, in Metall- oder Salzbadern. Die Anlaßtemperatur wird im Bereich zwischen 150 und 600 °C so gewählt, daß sich eine gewünschte Zähigkeit einstellt, s. Bild 5.1.19.

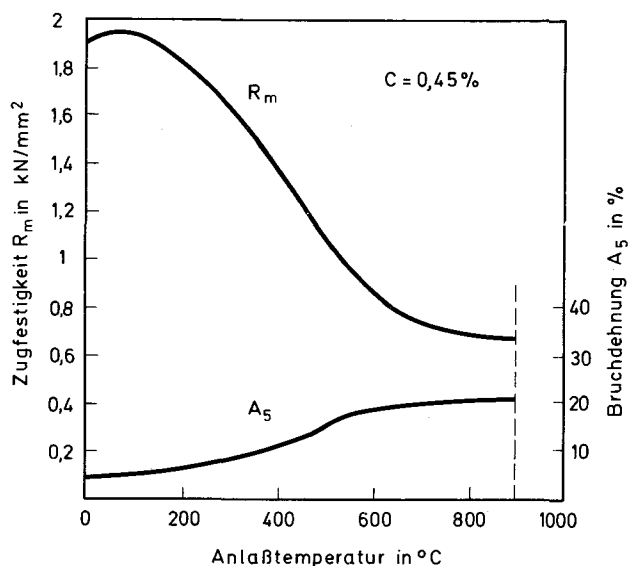


Bild 5.1.19 Einfluß der Anlaßtemperatur auf die Festigkeit und Bruchdehnung

#### c) Vergüten

Beim Vergüten von Konstruktionsstählen (Vergütungsstähle nach DIN 17200 [N 1]) soll bei angehobener Festigkeit eine hohe Zähigkeit des Stahls erreicht werden. Das Vergüten besteht aus gesteuertem Abkühlen und anschließendem Anlassen bei 450 bis 650 °C. Es entsteht beim unterperlitisches Stahl ein sehr feinkörniges Vergütungsgefüge hoher Zähigkeit.

#### 5.1.4.3 Wirkung von Legierungselementen

Beim bisher besprochenen Stahl, eine FeC-Legierung, haben die Stahlbegleiter Si, Mn u.a. nicht die Rolle von Legierungselementen, da durch diese Elemente die Stahleigenschaften nicht nennenswert beeinflusst werden. Man spricht von einem unlegierten Stahl [2].

Bei hohen Beanspruchungen und besonderen Einsatzbedingungen (tiefe und hohe Temperaturen, korrosive Medien usw.) kommt man mit den Eigenschaften der unlegierten

Stähle nicht mehr aus. Durch Zugabe von Legierungselementen können bestimmte Eigenschaften durch Bildung neuer Kristallarten erzielt werden. Man spricht von legiertem Stahl [2].

In der Praxis unterscheidet man:

niedriglegierte Stähle

(Summe der Legierungselemente < 5%)

hochlegierte Stähle

(Summe der Legierungselemente > 5%)

Durch Legierungselemente lassen sich die Stahleigenschaften in weitem Bereich verändern. Die Arten der Elemente, ihre absoluten und relativen Mengen beeinflussen einander in komplexer Weise, so daß ihre Wirkungen nur überschlägig angegeben werden können (s. [1], [2]), s. Tab. 5.1.2.

#### 5.1.4.4 Formgebung von Stahl durch Umformen

Die Herstellung von Fertigteilen (z.B. Werkzeugen wie Hammer und Meißel) und von Halbzeugen (z.B. Profilen) erfordert die Umformung von Stahl. Dabei wird je nach Umformtemperatur zwischen Warm- oder Kaltformgebung unterschieden.

Bei der Warmformgebung erholt sich die plastische Verzerung des Gitters, und die Verstreckung der Körner im Anschluß an die Warmverformung verschwindet durch Rekristallisation. Voraussetzung dafür ist die Höhe der Rekristallisationstemperatur, die um so höher sein muß, je mehr umgeformt worden war (Verformungsgrad  $\varphi = \ln(\text{Endvolumen}/\text{Anfangsvolumen})$ ). Die Rekristallisationstem-

peratur liegt zumindest über 450 °C. Zu den Warmformgebungsverfahren gehören ( $\vartheta > 900$  °C):

Schmieden,

Pressen, Strangpressen,

Walzen.

Erfolgt das Umformen unterhalb der Rekristallisationstemperatur (meist bei Raumtemperatur), so steigt die Festigkeit mit zunehmendem Verformungsgrad an. Man spricht von Kaltformgebung (Begriff: Kaltverfestigung). Dabei verliert der Stahl an Verformungsvermögen; durch Rekristallisationsglühen kann das Verformungsvermögen wieder angehoben werden. Durch die Kaltverformung entsteht eine Verstreckung der Körner (Verformungstextur) und als Folge davon Anisotropie: Zugfestigkeit in Kaltverformungsrichtung größer als normal dazu. Zu den Kaltverformungsverfahren gehören:

Ziehen, z. B. von Spanndrähten,

Tiefziehen, z. B. von Blechen für Trapezprofile,

Kaltverdrillen, z. B. von Rippentorstahl,

Kaltbiegen, z. B. von Stahlstäben, Spannstäben und

Bewehrungsstäben auf der Baustelle,

Kaltpressen, -stauchen, z. B. von Köpfchen auf Spanndrähten.

Während bei der Warmformgebung das Formen ohne Beeinflussung von Gefüge und Stahleigenschaften angestrebt wird, verfolgt man bei der Kaltformgebung z. B. folgende Ziele:

Herstellung von hochfesten Fertigprodukten geringen Querschnitts (z. B. Spannstähle, Tiefziehbleche),  
Blanke, unverzunderte Oberflächen,

Tab. 5.1.2 Grober Anhalt über die Wirkung von Legierungselementen

Eigenschaft	C	Si	Mn	Cr	Al	Ti	Mo	Ni	V	W	Nb
Festigkeit	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
Streckgrenze	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
Härte	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
Verformungsvermögen	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-
Kerbschlagzähigkeit	-	-	+	-		-		+			
Kaltverformbarkeit	-	-	-	-	-	-	-		-	-	
Warmverformbarkeit	-	-	+		-						
Schweißbarkeit	-	-	+		-	+					+
Kaltverfestigung	+	+	+	+	+			+			
Härtbarkeit, Vergütbarkeit	+	+	+	+	+	+	+		+		
Korrosionsbeständigkeit		+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Verschleißfestigkeit		+	+				+		+	+	+
Warmfestigkeit				+	+				+	+	+
Kaltzähigkeit		+		-	-			+	-	-	-

Cr – Chrom  
Ti – Titan  
Mo – Molybdän  
Al – Aluminium

Ni – Nickel  
V – Vanadium  
W – Wolfram  
Nb – Niob

+ positiver Einfluß  
- negativer Einfluß  
ohne Zeichen: kein oder unbek. Einfluß

Maßgenaue Querschnitte u. a. mehr.

Bild 5.1.20 zeigt schematisch den Einfluß der Umformungen auf das Gefüge.

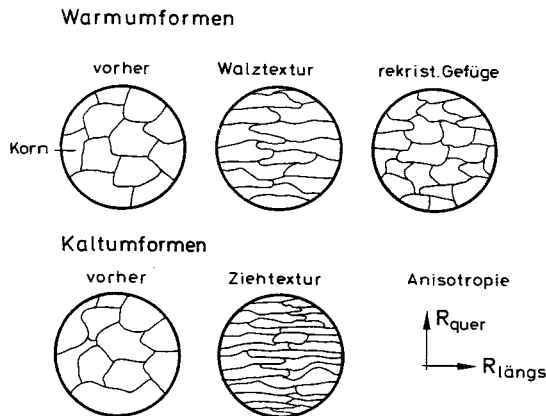


Bild 5.1.20 Einfluß des Warm- und Kaltformgebungsverfahrens auf das Gefüge

## 5.1.5 Stähle

### 5.1.5.1 Einteilung und Kennzeichnung der Stähle

#### Einteilung

Mehr aufgrund der Bedürfnisse des Maschinen- und Apparatebaus als nach denen des Bauwesens ist eine Vielzahl von Stählen entwickelt worden. Die Einteilung der Stähle erfolgt dabei nach den Gebrauchseigenschaften oder nach der chemischen Zusammensetzung. Außerdem unterscheidet man nach unlegierten und legierten Stählen (niedrig- und hochlegierte).

Unlegierte Stähle bezeichnet man häufig auch als Kohlenstoffstähle, weil für ihre Festigkeit und Verarbeitbarkeit der Kohlenstoffgehalt maßgebend ist. Außerdem wird auch der Gehalt der Stahlbegleiter  $\text{Si} \leq 0,5\%$  und  $\text{Mn} \leq 0,8\%$  begrenzt. Die allgemeinen Baustähle, Spann- und Betonstähle sind unlegierte Stähle.

Die niedriglegierten Stähle enthalten nicht mehr als 5% an Legierungselementen und Stahlbegleitern Si, Mn, Al, Ti und Cu zusammen. Bei hochlegierten Stählen entfällt diese Begrenzung.

Für den Ingenieur wurde eine Einteilung nach dem Einsatzgebiet entwickelt. Hiernach unterscheidet man:

- Bau- oder Konstruktionsstähle wie allgemeine Baustähle, Vergütungsstähle, warmfeste oder kaltzähe Stähle usw. und
- Werkzeugstähle.

#### Kennzeichnung der Stähle

Für Konstruktion, Ausschreibung, Herstellung u. a. m. ist die eindeutige Kennzeichnung der Stähle erforderlich. Neben den vollständigen Kennzeichen und Werkstoffnummern, die in den Normen und Werkstoffblättern enthalten sind, ist eine Kurzbezeichnung üblich. Die Kurzbezeichnung erfolgt nach der Zugfestigkeit (bzw. Streckgrenze) oder nach der Zusammensetzung oder nach anderen Gesichtspunkten.

#### a) Kennzeichnung nach der Zugfestigkeit oder Streckgrenze

Sie wird für Stähle angewandt, für deren Einsatz die Festigkeiten die wichtigsten Gebrauchseigenschaften sind. Beispiel: St 50 nach DIN 17 100 [N 2] mit  $50 \text{ kp/mm}^2 \triangleq 490 \text{ N/mm}^2$  Mindestzugfestigkeit.

#### b) Kennzeichnung nach der chemischen Zusammensetzung

Nichtlegierte Vergütungs- und Einsatzstähle werden nach dem Kohlenstoffgehalt bezeichnet. Beispiel: C 45 Vergütungsstahl nach DIN 17 200 mit 0,45% C.

Bei den niedrig legierten Stählen werden die maßgebenden Legierungselemente in der Bezeichnung aufgeführt, deren wahre Gehalte mit Legierungskennzahlen errechnet werden können. Beispiel: 50 CrMo 4 Vergütungsstahl nach DIN 17 200 mit 0,50% C und

$$\frac{4}{4} = 1\% \text{ Cr und } 1\% \text{ Mo.}$$

Die Legierungskennzahl der für Baustähle in Frage kommenden Elemente ist 4.

Bei den hochlegierten Stählen, Kennzeichen X, werden die Anteile der Legierungselemente unverschlüsselt angegeben. Beispiel: X 5 CrNi 18 9 nach DIN 17 440 enthält

0,05% C

18 % Cr

9 % Ni

In weiteren Möglichkeiten zur Kennzeichnung werden besondere Gebrauchseigenschaften sichtbar gemacht. Beispiele: WTSt für wetterfesten Baustahl, TTStE für kaltzähen Baustahl etc.

Die Tab. 5.1.3 und 5.1.4 zeigen einige wichtige Baustähle und deren Einsatzgebiete. Die Betonstähle und Spannstähle werden in Abschnitt 5.1.5.8 und 5.1.5.9 besprochen. In [N 3] sind die wesentlichen Gütenormen abgedruckt.

### 5.1.5.2 Zur Prüfung von Stahleigenschaften

Die Prüfung der mechanischen Eigenschaften, deren Grundbegriffe bereits im Abschnitt 4.1 erläutert worden waren, erfolgt nach Prüfnormen [N 4] oder nach produktbezogenen Prüfrichtlinien, auf die nur gedrängt eingegangen werden kann. Den Konstrukteur interessieren vorrangig die statischen und dynamischen Festigkeiten sowie das elastische und plastische Formänderungsvermögen unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung. Die wesentlichen Informationen über die konstruktive Einsetzbarkeit eines Stahls liefert das im Kurzzeitzugversuch gewonnene  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramm.

In Bild 5.1.21 sind die typischen  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien von Stahl dargestellt. Unbehandelte, naturharte Stähle (a) besitzen eine ausgeprägte Streckgrenze. Kaltverformte, wärmebehandelte und manche legierte Stähle (b) hingegen weisen einen stetigen Übergang von der Hooke'schen Geraden in den Verfestigungsbereich auf. Die Streckgrenze wird ersatzhalber durch die 0,2%-Dehngrenze markiert.

Die ausreichende plastische Verformbarkeit eines Stahls ist aus zwei Gründen wichtig: Wohl liegt die zulässige Spannung auf der elastischen Geraden, das hypothetische Versagen der Konstruktion muß jedoch aus Sicherheitsgrün-



Tab. 5.1.3 Stähle für Konstruktionen und Verbindungsmittel

Stahlart bzw. Gruppe	wichtige Stahlsorten	Streckgrenze N/mm <sup>2</sup>	Zugfestigkeit N/mm <sup>2</sup>	Anwendung
Allgemeine Baustähle nach DIN 17 100	St 33 St 37 St 44 St 52 St 50 bis 70	von 175 bis 355	von 290 bis 900	Stahlbau Apparatebau Geräte- und Maschinenbau
Wetterfeste Baustähle nach SEW 087-70	WTSt 37 und WTSt 52	235  355	350–440  510–610	Stahlbau  Apparatebau, Behälter
Feinkornbaustähle nach SEW 089-70	St E 460 und St E 690	460  690	560–730  790–940	Stahlbau Apparatebau Behälter
Rohrstähle nach DIN 1626 und DIN 1629	St 34 bis 52 St 35 bis 55			geschweißte und nahtlose Rohre
Schraubenstähle nach DIN 267 und DAST-R. 010	4.6 5.6 10.9	240 300 900	400 500 1000	Verbindungsmittel
Nichtrostende Stähle nach DIN 17 440				Fassadenelemente und Verbindungselemente im Fertigteilbau
Stahldrähte für Stahlseile nach DIN 2078 u. a.				Seile im Stahl- und Betonbrückenbau, Abspannungen, Seilnetze

Tab. 5.1.4 Wichtige Konstruktionsstähle und deren Einsatzgebiete

Bezeich- nung der Stahlgruppe	Bezeich- nung nach chemischer Zusammen- setzung	Norm SEW-BI. Richtlinie IfBt-Zul.	Bezeich- nung oder Werkstoff- Nr.	Wesentliche Anwendungs- eigenschaften	Wesentliche Einsatzgebiete	Einsatz- häufig- keit
Allgemeine Baustähle	unlegiert	DIN 17 100	St 33 bis St 70	angepaßte Festig- keit und Verform- barkeit; Schweiß- eignung	Stahlkonstrukti- onen aller Art mit St 37 und St 52	hoch
Feinkorn- baustähle	niedrig legiert	DAST-Richtlinie Nr. 011 + SEW 089-70	St E 460 St E 690	hohe stat. Festigkeit; Schweißeignung	hoch und vorwie- gend ruhend bean- spruchte Stahlkon- struktionen	gering
Wetterfeste Baustähle	niedrig legiert	DAST-Richtlinie Nr. 007 + SEW 087-70	WT St 37 WT St 52	wie allg. Baustähle mit werkstoffspezi- fischer Korrosions- beständigkeit	Stahlkonstrukti- onen aller Art	gering
Feinbleche	unlegiert	DIN 1623 DIN 1624		Kaltformbarkeit Schweißeignung	als glatte oder profi- lierte Bleche ver- zinkt und/oder kunststoffbe- schichtet als Fassa- denelemente etc.	hoch

DAST Deutscher Ausschuß für Stahlbau  
SEW Stahl-Eisen-Werkstoffblatt

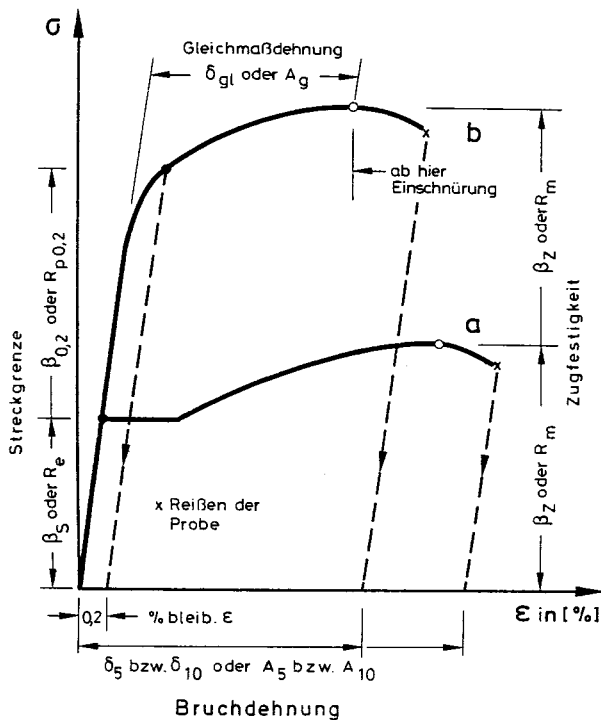


Bild 5.1.21 Typische Spannungs-Dehnungslinien von Stahl, Begriffe und übliche Bezeichnungen

den duktil ablaufen (plastische Verformung als Warnsignal). Die Kaltformung von Stahl benötigt und verzehrt Plastizität, aber eine Restplastizität muß aus den o.g. Gründen weiter zur Verfügung stehen.

Die Verformungen werden im Zugversuch entlang einer Basisstrecke  $l_0$  gemessen, die z.B. bei Rundstäben mit dem Durchmesser  $d_s$  das Fünf- oder Zehnfache von  $d_s$  beträgt, s. Bild 5.1.22. Bis zur Zugfestigkeit ist eine über die Stablänge konstante, plastische Gleichmaßdehnung eingetreten. Der fallende Ast im  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramm signalisiert die Einschnürung beim zähen Bruch. Die große plastische Dehnung zu beiden Seiten der Bruchstelle häuft sich gleichsam auf die Gleichmaßdehnung auf. Die Bruchdehnung  $\delta_5$  oder  $A_5$  stellt dann den Mittelwert der Dehnungen innerhalb der von  $l_0$  auf  $l$  verformten Basis dar. Hat man jedoch eine größere Basis, z.B.  $10 d_s$ , gewählt, so fällt  $\delta_{10}$  oder  $A_{10}$  kleiner aus. Kennwerte der Bruchdehnung hängen also von der Basislänge ab. Im Bruchquerschnitt kann die Brucheinschnürung  $\Psi$  oder  $Z$  als Stabflächenminderung, bezogen auf den Ausgangsquerschnitt, bestimmt werden. Zur Beschreibung der Kaltformbarkeit werden u.a. Biege- oder Kaltversuche durchgeführt.

Das Dauerstandverhalten interessiert im Bauwesen in zwei Bereichen:

- Im Spannbetonbau muß der zeitabhängige Verlust an Vorspannkraft infolge von Stahlrelaxation bekannt sein; das Kriechbruchverhalten ist wegen des ausreichenden Abstands zur Streckgrenze ohne Belang.
- Bei erhöhten Betriebstemperaturen, vor allem aber für den Brandfall, muß die Dauer- bzw. Zeitstandfestigkeit bekannt sein.

Die Dauerschwingfestigkeit beschreibt das Verhalten des Materials und von Verbindungen unter oftmals wiederkehrender Beanspruchung. Die wesentlichen Begriffe, die

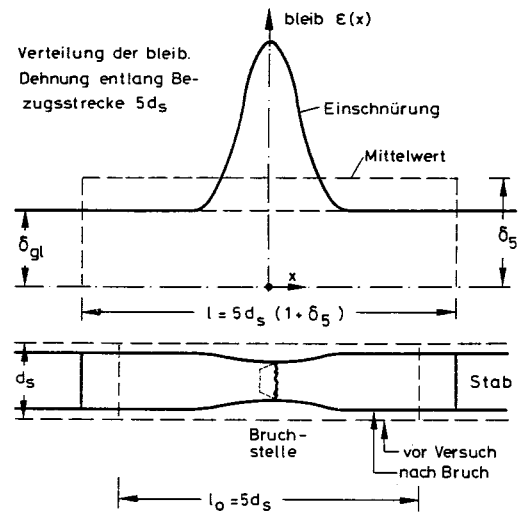


Bild 5.1.22 Bruchdehnung von Stahl, Begriffe und Bezeichnungen beim Rundstab

Bruchentstehung und die Methode der Prüfung (s. DIN 50100, [N 4]), wurden bereits in Abschnitt 4.1.7 besprochen.

Das spröde Versagen einer Konstruktion ist unter allen Umständen wegen der Folgen zu unterbinden. Aus diesem Grunde ist das Sprödbbruchverhalten von Stahl zu untersuchen. Die Neigung zum Sprödbbruch eines Stahls wird von inneren und äußeren Einflußgrößen bestimmt. Zu den inneren Einflußgrößen zählen das Stahlgefüge sowie Ausscheidungen und Verunreinigungen. Die äußeren Einflußgrößen umfassen die Konstruktion und die Beanspruchungsbedingungen. Die Neigung zum Sprödbbruch nimmt zu bei tiefen Temperaturen, bei schnell ablaufender Beanspruchung und vor allem bei einem mehrachsigen Spannungszustand, wie er stets an Kerben (z.B. Schweißnahtissen, konstruktiven Kerben etc.) auftritt. Die Prüfung der Sprödbbruchneigung eines Stahls mit einem bestimmten Gefügestand usw. erfolgt im Kerbschlagbiegeversuch nach DIN 50115 [N 4]. Eine kleine prismatische Biegeprobe, s. Bild 5.1.23, mit einem definierten Kerb in der Biegezugzone versehen, wird

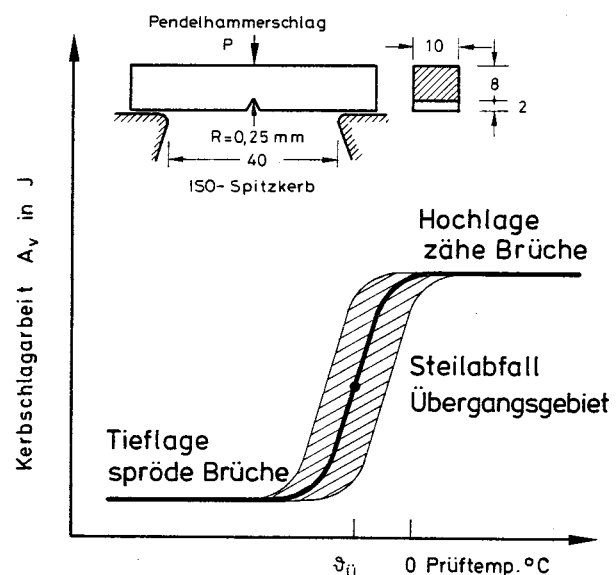


Bild 5.1.23 Kerbschlagarbeit abhängig von der Temperatur bei bestimmter Kerbform

durch einen Pendelhammer schlagartig gebogen. Dabei wird die von der Probe verzehrte Schlagarbeit bei variabler Prüftemperatur gemessen. Zähne Brüche mit hoher Schlagarbeit  $A_v$  liegen auf einer Hochlage, spröde Brüche mit geringer Schlagarbeit hingegen auf einer Tieflage. Der Wechsel von zähem zu sprödem Bruch wird durch ein steiles Übergangsgebiet angezeigt.

Je geringer die Neigung des Stahls zum Sprödbbruch ist, um so mehr wird der Steilabfall zu tieferen Temperaturen verschoben [10 und 11].

Von großer Bedeutung sind Verfahren zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, in [2] wird ein Überblick gegeben. In [N 4] und [N 5] sind Normen der Prüfverfahren etc. abgedruckt.

### 5.1.5.3 Allgemeine Baustähle

Die unlegierten allgemeinen Baustähle nach DIN 17100 [N 2] werden im Stahlbau am häufigsten angewendet. Die Sorten, deren chemische Zusammensetzung und Eigenschaften, sind in den Tab. 5.1.5 und Tab. 5.1.6 enthalten. Durch die der Kurzbezeichnung für die Mindestzugfestigkeit in  $\text{kp/mm}^2$  vorgestellten Buchstaben wird die Vergie-

Bungsart angegeben. Die Stähle sind in Gütegruppen 2 und 3 eingeteilt, wodurch nicht nur die Vergießungsart, sondern auch der Anteil der schädlichen Stahlbegleiter Phosphor, Schwefel und Stickstoff beschrieben werden.

Zähigkeit, Alterungsbeständigkeit und Schweißneigung nehmen mit Abnahme der Anteile der Stahlbegleiter P, S und N zu. Die Stähle der Gruppen 2 und 3 sind im allgemeinen schweißgeeignet, wobei die besonders beruhigte Gruppe 3 der beruhigten Gruppe 2 vorzuziehen ist. Dies gilt bis St 52-3 einschließlich. Bei unberuhigten Stählen besteht die Gefahr, daß beim Schweißen Seigerungszone angeschlossen werden und der Bruch in der Schweißnaht erfolgt. Die Sprödbrechempfindlichkeit des Materials wird durch die Kerbschlagbiegearbeit, abhängig von der Prüftemperatur, beschrieben. Je tiefer die Temperatur bei der geforderten Mindestarbeit ist, um so unempfindlicher gegen Sprödbbruch ist der Werkstoff. Im Vergleich zum aus der Walzhitze geformten aber ansonsten unbehandelten Produkt wird durch anschließendes Normalglühen die Übergangstemperatur zu tieferen Werten verschoben.

Die Stähle nach DIN 17100 kommen als warmgeformte Formstähle und Bleche auf den Markt. Mit Ausnahme des

Tab. 5.1.5 Sorten und chemische Zusammensetzung der Stähle nach DIN 17100 (Auszug)

Stahlsorte	Desoxidationsart		Zusammensetzung in M.-% max; $t \leq 16 \text{ mm}$ ; Stückanalyse			
	Abk.		C	P	S	N
St 33	—	freigestellt	—	—	—	—
St 37-2	—	freigestellt	0,21	0,065	0,065	0,010
U St 37-2	U	unberuhigt	0,21	0,065	0,065	0,009
R St 37-2	R	beruhigt	0,19	0,060	0,060	0,010
St 37-3	RR	bes. beruhigt	0,19	0,050	0,050	—
St 44-2	R	beruhigt	0,24	0,060	0,060	0,010
St 44-3	RR	bes. beruhigt	0,23	0,050	0,050	—
St 52-3	RR	bes. beruhigt	0,22	0,050	0,050	—
St 50-2	R	beruhigt	—	0,060	0,060	0,010
St 60-2	R	beruhigt	—	0,060	0,060	0,010
St 70-2	R	beruhigt	—	0,060	0,060	0,010

Tab. 5.1.6 Mechanische und technologische Eigenschaften der Stähle nach DIN 17100 (Auszug)

Stahlsorte	Zugfestigkeit $R_m$	Obere Streckgrenze $R_{eH}$	Bruchdehnung $A_5$	Kerbschlagarbeit $A_v$ ISO-Spitzkerb			Faltwinkel 180° bei Dicke a Dorn-Ø
				Behandlungsart	Temp.	$A_v$	
Einheit	$\text{N/mm}^2$	$\text{N/mm}^2$	%	—	°C	J	—
St 37-2	340 bis 470	235	26	U, N	+ 20	27	1 × a
U St 37-2				U, N	+ 20	27	
R St 37-2				U, N	+ 20	27	
St 37-3				U	± 0	27	
				N	− 20	27	
St 52-3	490 bis 630	355	22	U	± 0	27	2,5 × a
				N	− 20	27	

U warmgeformt, unbehandelt

N normalgeglüht

Probendicke  $a \leq 16$  bzw.  $> 3 \text{ mm}$ , Längsproben

Spannungsarm- und Normalglühens ist eine Wärmebehandlung nicht gestattet. Die meisten Sorten können kaltumgeformt werden. Die Stähle St 37 und St 52 kommen am meisten zur Anwendung. Bild 5.1.24 zeigt die Spannungs-Dehnungslinien. Bezüglich des Dauerschwingverhaltens s. [6].

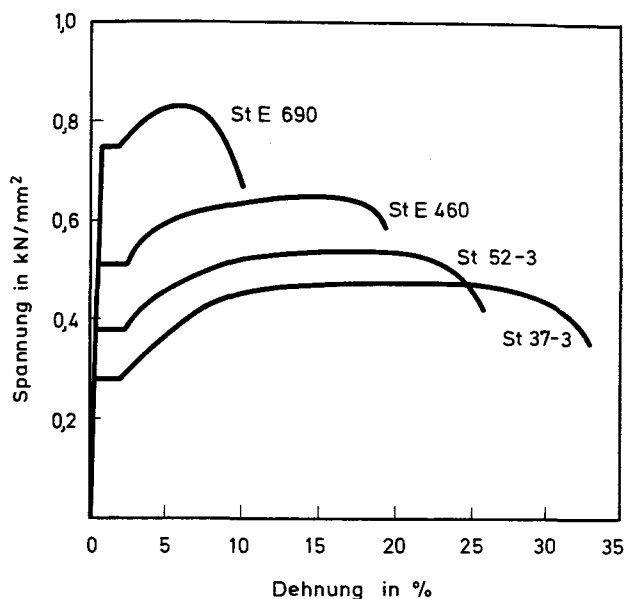


Bild 5.1.24 Spannungs-Dehnungslinien von Baustählen

#### 5.1.5.4 Wetterfeste Baustähle

Unlegierte Baustähle rosten im ungeschützten Zustand unter dem Einfluß der Witterung, so daß stets ein passiver Korrosionsschutz erforderlich ist. Durch die Entwicklung der wetterfesten Baustähle ist es bei gegenüber Stahl nach DIN 17 100 höheren Herstellkosten möglich geworden, auf den Korrosionsschutz zu verzichten. Der Stahl schützt sich selbst.

Der Schutz kommt durch die kombinierte Wirkung der Legierungselemente Kupfer, Nickel und Chrom zustande. Unter dem Einfluß der Witterung bildet sich im Laufe von rd. 3 Jahren auf der Stahloberfläche eine festhaftende und dichte, oxidische Passivschicht aus Salzen des Kupfers, Nickels und Chroms (Sulfate, Phosphate etc.). Die Oberfläche wird abgedichtet, die Korrosion kommt zum Stillstand. Ein Wechsel von Trocknen und Befeuchten ist erforderlich.

Bei dauernd feuchter Oberfläche und bei Einwirkung von Chloriden (Meeresnähe) kann sich die Schutzschicht nicht bilden.

Wetterfeste Baustähle sind nicht genormt, sondern in SEW 087-70 [N 6] erfaßt und bauaufsichtlich zugelassen. Es werden die Stähle WTSt 37-2, WTSt 37-3 und WTSt 52-3 hergestellt, deren mechanische Kennwerte denen der entsprechenden Stähle nach DIN 17 100 entsprechen. Konstruktive Hinweise enthält die DAST-Richtlinie 007 [N 7].

#### 5.1.5.5 Hochfeste schweißgeeignete Feinkornbaustähle

Feinkornbaustähle sind hochfeste und schweißgeeignete Stähle. Sie sind besonders beruhigt und sprödebruchunempfindlich. Sie wurden für Bauteile entwickelt, die hoch auf Zug beansprucht werden. Bei Druckbeanspruchung bringt die hohe Festigkeit keine Vorteile, da bei dünnwandigen Konstruktionen die Stabilität mehr vom unveränderbaren E-Modul als von der Streckgrenze abhängt. Ebenso sind hochfeste Stähle bei dynamisch beanspruchten Konstruktionen nicht vorteilhafter, da die Dauerfestigkeit gekerbter Bauteile nicht mit der Streckgrenze ansteigt.

Gleichwohl gibt es zahlreiche Anwendungsfälle mit vorwiegend ruhender Beanspruchung wie Druckbehälter, bei denen die Festigkeit der Feinkornbaustähle ausgenutzt werden kann.

Für Stahlbauten wurden die Feinkornbaustähle von Tab. 5.1.7 entwickelt und zugelassen [N 8, N 9]. Von der Zusammensetzung her sind sie als niedriglegierte Stähle anzusehen. Die erhöhte Festigkeit des St E 460, der nur im normalgeglühten Zustand geliefert wird, beruht auf Ausscheidungshärtung, bei der Karbide und Nitride der aufgeführten Legierungselemente und ein feines Korn gebildet werden. Beim höherfesten St E 690 wird zur Festigkeitssteigerung außerdem eine Vergütung angewandt. Bild 5.1.24 zeigt die Spannungs-Dehnungslinien. Feinkornbaustähle können kalt und warm umgeformt sowie geschweißt werden. Nähere Angaben enthält die DAST-Richtlinie 011 [N 9].

#### 5.1.5.6 Nichtrostende Stähle

Die nichtrostenden Stähle nach DIN 17 440 [N 10] sind wegen ihrer hohen Gehalte an Chrom und Nickel hochlegiert und korrosionsbeständig. Ihre Herstellkosten übertreffen die der Stähle von DIN 17 100 beträchtlich.

Tab. 5.1.7 Hochfeste und schweißgeeignete Feinkornbaustähle nach SEW 089-70 (Auszug)

Sorte	Wärmebehandlung	$R_e$	$R_m$	$A_5$	Kerbschlagarbeit ISO-V; längs		Stahlart
					- 20 °C	- 60 °C	
—	—	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	J	J	—
St E 460	N	460	560 bis 730	17	39	—	Ni-V
							Cu-Ni-V
							Ni-Ti
St E 690	V	690	790 bis 940	16	50	30	Ni-Cr-Mo-B
							Cr-Mo-Zr

Die Anwendung ist zwei Gebieten zuzuordnen:

- Selbsttragende Außenbauteile wie Fassadenelemente und Gestaltungselemente im Gebäudeinneren,
- Tragende Verankerungselemente für Betonfertigteile.

Für den äußeren Abschluß von Gebäuden werden häufig Betonfertigteile in Form von mehrschichtigen Elementen (Sandwich-) oder von einschichtigen, hinterlüfteten Platten verwendet. Bild 5.1.25 zeigt ein Beispiel. Da die Stahlteile zur Verankerung der Betonelemente an der Tragkonstruktion meist unzugänglich sind, müssen korrosionsstabile Werkstoffe gewählt werden.

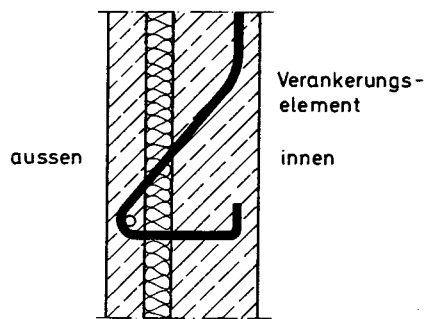


Bild 5.1.25 Inneres Verankerungselement für eine Betonsandwichplatte

Die für Verankerungen zugelassenen Stähle und deren Zusammensetzung sind in Tab. 5.1.8 aufgeführt. Sie werden im abgeschreckten Zustand als meist dünnwandiger Formstahl und dünnwandiges Blech geliefert. Anschließende Wärmebehandlung, Kaltverformung sowie Schweißung sind möglich.

Im Lieferzustand weisen die Stähle folgende mechanische Kennwerte auf: Streckgrenze rd. 230 N/mm<sup>2</sup>; Zugfestigkeit 500 bis 750 N/mm<sup>2</sup> und Bruchdehnung A<sub>5</sub> ≈ 40%.

An der Atmosphäre überzieht sich die metallisch blanke Oberfläche spontan mit einer nur wenige µm dicken, passiven Deckschicht, die sich bei Verletzung sofort erneuert. Die Stähle nach Tab. 5.1.8 sind technisch korrosionsbeständig, unterscheiden sich jedoch in ihrer ästhetischen Beständigkeit. In hochkorrosiver Umgebung sind die mit Molybdän legierten Stähle den anderen überlegen, da sie eine höhere Sicherheit gegen interkristalline Korrosion besitzen.

#### 5.1.5.7 Weitere Konstruktionsstähle

Für die hier nicht besprochenen Stähle von Tab. 5.1.3 und 5.1.4 muß der Verweis auf Normen genügen. Neben den

Konstruktionsstählen von Tab. 5.1.3 und 5.1.4 wurden weitere Sorten für bestimmte Anwendungsfälle wie Kesselbleche für hohe Temperaturen und kaltzähe Stähle für Flüssiggasbehälter entwickelt. Ein Überblick hierüber ist in [2] enthalten. Vergütungs- und Einsatzstähle kommen im Bauwesen nur für die Herstellung von Verankerungselementen des Spannbetons zur Anwendung, s. [N 3].

#### 5.1.5.8 Betonstähle

##### Anwendung und Sorten

Bekanntlich ist Beton ein druckstarker aber zugschwacher Baustoff. Daher müssen die Tragwerke aus Beton zur Aufnahme von inneren Zugkräften durch Betonstahl bewehrt werden. Das Zugtragvermögen des Stahls wird erst nach dem Reißen des Betons aktiviert. Damit sind Risse im Stahlbeton eine planmäßige Eigenschaft der Bauart. Die Breite der Risse muß aber wegen der Gefahr der Stahlkorrosion beschränkt werden.

Die Betonstähle nach DIN 488 [N 11] sind unlegierte Massenstähle. Sie werden in Form von Stäben mit Kreisquerschnitt und als Betonstahlmatten sowie in verschiedenen Sorten hergestellt. Tab. 5.1.9 enthält auszugsweise jene Betonstähle, die in der Praxis eingesetzt werden. Den vollständigen Überblick enthält DIN 1045 [N 12]. Neben den Betonstählen von DIN 488 sind weitere, bauaufsichtlich zugelassene Stähle im Einsatz. Die Schweißbeugung der Betonstähle wird in Abschnitt 5.1.6 besprochen.

Die Einteilung der Sorten erfolgt nach der Festigkeit, der Herstellungsart und nach der Oberflächengestalt.

##### a) Einteilung nach der Festigkeit

Die im Kurznamen angegebenen beiden Zahlen sind die Streckgrenze und Zugfestigkeit des Stahles; es gibt also drei Festigkeitsklassen (Kurzzeichen I, III und IV).

##### b) Einteilung nach der Herstellungsart

Hiernach unterscheidet man:

- warmgewalzter, naturharter Betonstahl, dessen mechanische Eigenschaften von der chemischen Zusammensetzung bestimmt werden, Kurzzeichen: U,
- kaltverformter Betonstahl, dessen mechanische Eigenschaften durch Kaltverformung von naturhartem Ausgangsmaterial bestimmt werden (Verdrehen beim Rippenroststahl, unterster Stab auf Bild 5.1.26, oder Recken des Vormaterials für geschweißte Betonstahlmatten), Kurzzeichen: K.

Tab. 5.1.8 Chemische Zusammensetzung der nichtrostenden Stähle nach DIN 17440 für Verankerungsteile etc.

Sorte	Werkstoff Nr.	Chem. Zusammensetzung in Gew.-%, max. Werte						
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti
X 5 CrNi 18 9	1.4301	0,07	1,0	2,0	17,0–20,0	8,5–10	–	–
X 10 CrNiTi 18 9	1.4541	0,10	1,0	2,0	17,0–19,0	9,0–11,5	–	≥ 5 × C
X 5 CrNiMo 18 10	1.4401	0,07	1,0	2,0	16,5–18,5	10,5–13,5	2,0–2,5	–
X 10 CrNiMoTi 18 10	1.4571	0,10	1,0	2,0	16,5–18,5	10,5–13,5	2,0–2,5	≥ 5 × C

Tab. 5.1.9 Mechanische und technologische Eigenschaften von Betonstahl nach DIN 488 (Auszug aus DIN 1045 [N 12])

Verarbeitungsform		Betonstahlstab			Betonstahlmatte		
Oberflächengestalt		glatt G	gerippt R Schrägrippen		glatt G	profiliert P	gerippt R Schräg- rippen
Stahlherstellung		U	U	K	K	K	K
Kurzname		BSt 220/340 GU	BSt 420/500 RU	BSt 420/500 RK	BSt 500/550 GK	BSt 500/550 PK	BSt 500/550 RK
Kurzzeichen	–	IG	III U	III K	IV G	IV P	IV R
Durchmesser $d_s$	mm	5–28	6–28	6–28	4–12	4–12	4–12
Streckgrenze	N/mm <sup>2</sup>	220	420	420	500	500	500
Zugfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	340	500	500	550	550	550
Bruchdehnung $\delta_{10}$ min.	%	18	10	10	8	8	8
Dorn-Ø für Kaltversuch, 180°	$d_s \cdot a$	2	–	–	3	–	–
Biegerollen-Ø beim Rückbiegeversuch für $d_s = 13–18$ mm	$d_s \cdot b$	–	6	6	–	–	–
Dauerschwingfestigkeit bei $2 \sigma_A \cdot 2$ Mill, gerade Stäbe	N/mm <sup>2</sup>	180	230	230	120	120	120
gebogene Stäbe mit $15 d_s$	N/mm <sup>2</sup>	180	200	200	120	120	120
Knotenscherkraft $S = c \cdot A_s \cdot \beta_s$	–	–	–	–	0,35	0,30	0,30

#### c) Einteilung nach der Oberflächengestalt

Betonstabstähle werden entweder als glatte, runde Stäbe oder als Stäbe mit einer Oberflächenprofilierung hergestellt. Hierfür gibt es mehrere Gründe: Zum einen ermöglicht die Form der Oberfläche die Unterscheidung der Sorten; zum anderen wird durch eine Oberflächenprofilierung die Koppelung zwischen Betonstahl und umgebendem Beton über Verbund verbessert. Folgende Oberflächenformen werden hergestellt:

- glatte Stäbe, Kurzzeichen G
- gerippte Stäbe, Kurzzeichen R
- profilierte Stäbe, Kurzzeichen P

Bezüglich der Oberflächengestalt wird auf DIN 488 verwiesen. Bild 5.1.26 zeigt einige Betonstahlsorten nach DIN 488. Darüber hinaus gibt es zugelassene Betonrippenstabstähle IV der Herstellungsart U und K. In Zukunft strebt man nach uneingeschränkt schweißgeeigneten Stählen.

#### BETONSTAHL DIN 488

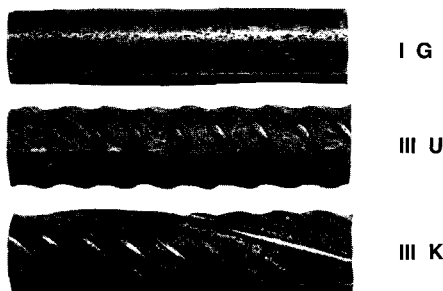


Bild 5.1.26 Einige Betonstabstähle nach DIN 488

#### Mechanische Eigenschaften

In Bild 5.1.27 sind die Spannungs-Dehnungs-Linien der Betonstähle dargestellt. Die naturharten Stähle IG und IIIU besitzen eine ausgeprägte Streckgrenze.

Betonstahlmatten werden aus kaltgewalzten Stäben durch Widerstandspunktschweißung hergestellt. Da ein Teil der Zugkräfte am Schweißknoten an den Beton abgegeben wird, muß dieser eine bestimmte Scherfestigkeit besitzen. Die Dauerschwingfestigkeit einbetonierter Stäbe ist wichtig für die Konstruktion von z. B. Verkehrsbauwerken. Die Rippen auf der Staboberfläche wirken als Kerben, so daß gerippte Stäbe eine geringere Schwingbreite  $2 \sigma_A$  als glatte Stäbe im freien Zustand ertragen. Einbetonierte gerade Rippenstäbe hingegen besitzen eine höhere Dauerschwingfestigkeit als glatte Stäbe. Eine weitere Abminderung der Dauerschwingfestigkeit tritt an Stababbiegungen auf, die durch die plastische Verformung des Stahls beim Kaltbiegen und durch Betonverformungen unter der Abbiegung verursacht werden. Nähere Angaben sind in [6] enthalten. Die Tab. 5.1.9 gibt die Mindestwerte der Dauerschwingfestigkeit an, deren Prüfung nach [N 11] erfolgt.

#### Verarbeitungseigenschaften

Die Betonstähle müssen zur Anpassung an den Verlauf der Zugkräfte im Bauteil und zur Verankerung im Beton kaltgebogen werden können. Die Kaltbiegung vor dem Einbau erfolgt über Biegerollen, deren Durchmesser um so kleiner sein kann, je größer die Bruchdehnung des Stahles ist. Auf der Baustelle müssen auch bereits gebogene Stäbe, z. B. zur Korrektur, rückgebogen werden können. Da die Kaltbie-

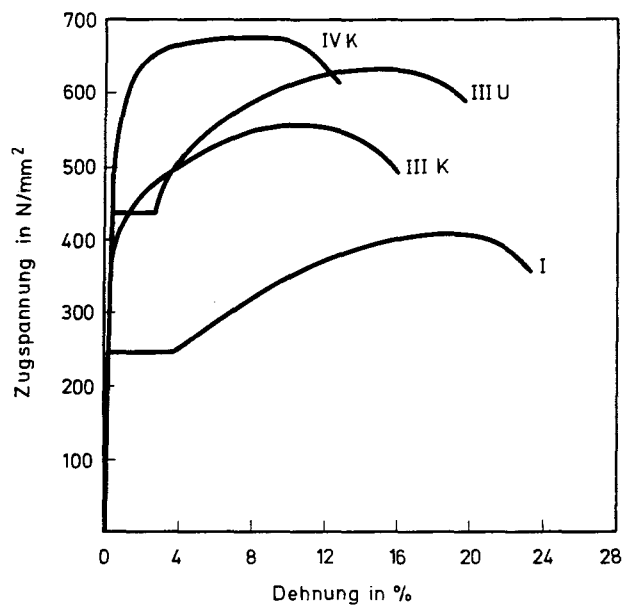


Bild 5.1.27 Typische Spannungs-Dehnungslinien von Betonstählen

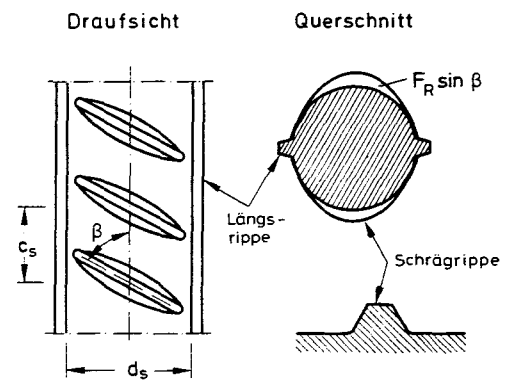
gung zur Reckalterung und damit zur Versprödung führt, muß Stahl III eine gewisse Rückbiegefähigkeit im künstlich gealterten Zustand aufweisen. Das Warmbiegen von kaltverformtem Betonstahl führt zur Entfestigung und ist deshalb untersagt.

#### Verbundeigenschaften

Sobald in einem Stahlbetonbauteil Risse durch Überwinden der niedrigen Betonzugfestigkeit aufgetreten sind, muß die Zugkraft des Betonstahls über Verbund in den Beton eingeleitet werden können (Verbund = Kraftschluß zwischen Beton und Stahl über dessen Oberfläche; Stahl + Beton = Verbundbaustoff Stahlbeton). Glatter Betonstahl leistet den Kraftschluß nur über seinen geringen Haftwiderstand. Bei höherfesten und damit höher ausnutzbaren Stählen genügt der Haftwiderstand nicht mehr; durch Rippen wird der wirkungsvollere Scherwiderstand aktiviert. Die Rippen wirken als Dübel: Die Zugkraft im Stab wird an jeder Rippe anteilig an den Beton durch Leibungsdruck übertragen, womit aber auch innere Sprengzugkräfte verbunden sind.

Bild 5.1.28 zeigt, daß die Geometrie der Rippung durch eine dimensionslose Kenngröße, die bezogene Rippenfläche  $f_R$ , beschrieben werden kann. Die bezogene Rippenfläche ist das Verhältnis der Leibungsfläche der Rippen, auf die der Leibungsdruck wirkt, zur Scherfläche. Gestützt auf Untersuchungen schreibt DIN 488 Mindestwerte für  $f_R$  vor: Z. B.  $f_R \geq 0,065$  für  $d_s \geq 12$  mm, BSt III.

Die verbesserte Verbundwirkung von Betonrippenstahl gegenüber glattem Stahl ist in mehrfacher Hinsicht vorteilhaft. Wie Bild 5.1.29 zeigt, weist ein Balken, der mit glattem Stahl bewehrt wurde, gegenüber einer Bewehrung mit Rippenstahl ein ungünstigeres Rißbild auf. Es treten wenige, aber dafür breite Risse auf, wodurch die Korrosionsgefahr ansteigt. Die Verwendung von Betonrippenstahl erlaubt einfachere Verankerungen, wie z. B. den Fortfall von Endhaken am Balkenende.



$$\text{bezogene Rippenfläche} = \frac{\text{Leibungsdruckfläche}}{\text{Umfangsscherfläche}}$$

$$f_R = \frac{2 F_R \sin \beta}{\pi d_s c_s}$$

Bild 5.1.28 Bezogene Rippenfläche am Beispiel des naturharten Betonrippenstahls

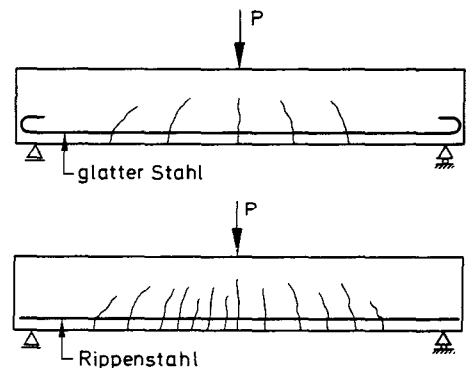


Bild 5.1.29 Einfluß der Rippung auf das Rißbild eines Stahlbetonbalkens

#### 5.1.5.9 Spannstähle

##### Anwendung und Sorten

Das Bestreben nach rissefreien Tragwerken führte zum Spannbeton, der auch eine größere Biegesteifigkeit besitzt. Zur Erklärung der Idee des Spannbetons dient Bild 5.1.30. Vor dem Aufbringen einer äußeren Last wird der Balken in der Zugzone vorgedrückt, indem der Spannstahl, am linken Ende gegen das Balkenende verankert, am rechten Ende gegen den Balken gespannt und anschließend verankert wird. Das den Stahl umgebende Hüllrohr erlaubt dessen unbehinderte Dehnung.

Es wird also ein Eigenspannungszustand aufgebracht und gleichsam »eingefroren«. Die Druckspannungen infolge Vorspannung in der Zugzone werden durch Zugspannungen infolge Last aufgezehrt. Durch entsprechende Wahl der Vorspannung kann die Rißbildung vermieden werden. Schwinden und Kriechen des Betons erzeugen einen Verlust an Vorspannkraft. Nur bei Verwendung hochfester und damit hoch beanspruchbarer Spannstähle ist die verbleibende Vorspannkraft groß genug, um das Reißen des Betons zu vermeiden.

Spannstähle sind in der Bundesrepublik Deutschland keine genormten, sondern zulassungspflichtige Baustoffe. Nach der Art der Herstellung und den hierbei erzielten Festigkei-

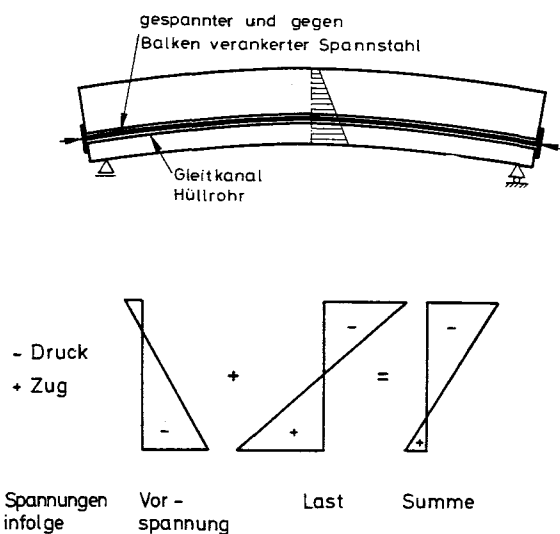


Bild 5.1.30 Zur Erklärung der Vorspannung

ten kann man die in Tab. 5.1.10 aufgeführten Klassen unterscheiden. Die Tab. 5.1.10 stellt nur einen Überblick über die Eigenschaften der 88 im Jahre 1981 in der Bundesrepublik Deutschland zugelassenen Spannstähle dar.

#### Mechanische Eigenschaften

Bild 5.1.31 zeigt typische Spannungs-Dehnungslinien von Spannstählen; die der Betonstähle I G und III K sind ebenfalls eingetragen. Eine ausgeprägte Streckgrenze ist nicht vorhanden, an ihre Stelle tritt die 0,2%-Dehngrenze  $\beta_{0,2}$ . Die Festigkeitswerte sind Nennfestigkeiten, die in höchstens 5% aller Fälle unterschritten werden dürfen. Mit Zunahme der Festigkeit sinkt die Verformbarkeit. Im Bauwerk beträgt die Gebrauchsspannung in der Regel 55% der Nennzugfestigkeit. Das Schweißen von Spannstahl ist ausgeschlossen. Bild 5.1.32 zeigt einige Spannstahlsorten. Für den Einsatz von Spannbeton, bei vorwiegend nichtru-

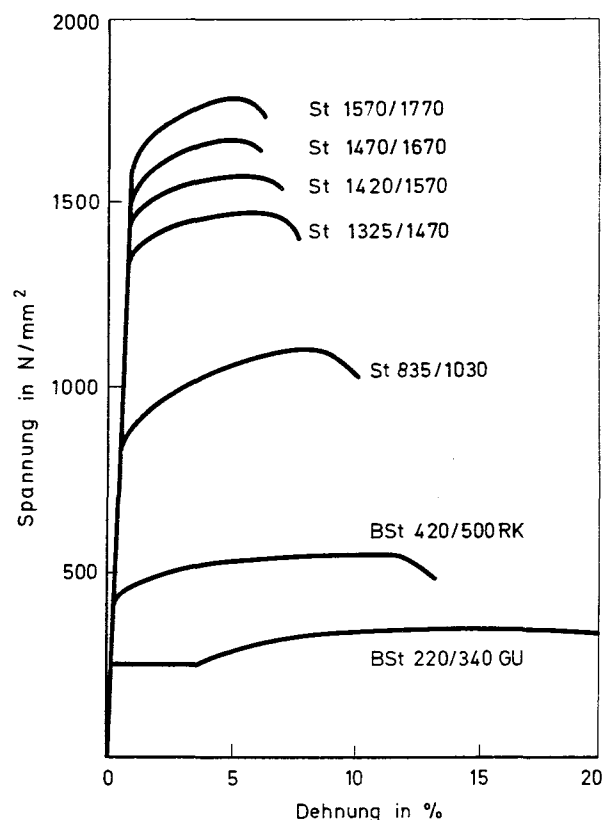


Bild 5.1.31 Spannungs-Dehnungslinien von Spann- und Betonstählen

hender Belastung, muß das Dauerschwingverhalten von Spannstahl bekannt sein. Die Spannstahlprobe wird hierzu bei fester Oberspannung  $\sigma_o$  und mit einer gewählten Schwingbreite  $2 \sigma_a$ , entsprechend Abschnitt 4.1.7, einem schwellenden Zug unterworfen (Einstufen- oder Wöhlerversuch). Bild 5.1.33 zeigt beispielhaft die gemessenen Bruch-

Tab. 5.1.10 Überblick über die Spannstähle (Auszug)

Herstellungsart	Festigkeits- klasse St <sup>1</sup> $\beta_s$ oder $\beta_{0,2}/\beta_z$	Durchmesser, Form etc.	E-grenze $\beta_{0,01}$	Bruch- dehnung $\delta_{10}$	Gleich- maß- dehnung $\delta_{gl}$	Schwing- breite $2 \sigma_A$
	N/mm <sup>2</sup>	mm	N/mm <sup>2</sup>	%	%	N/mm <sup>2</sup>
warmgewalzt, gereckt und angelassen	835/1030 885/1080 1080/1230	15–36 rund, glatt oder Gewinderippen	735 bis 950	6–7	4	200 bis 380
vergütet	1325/1470 und 1420/1570	rund, glatt oder ge- rippt, flachgerippt 6–16	950 bis 1220	6	4	195 bis 350
kaltgezogen (mit und ohne Anlassen)	1375/1570 1470/1670 1570/1770	5–12,2 rund, glatt und profilierter	1150 bis 1350	6	2	210 bis 585
siebendrätige Litzen (kaltgezogen und angelassen)	1570/1770	9,3 bis 15,3	1150 bis 1350	6	2	210 bis 310

1 Stahlbezeichnung z. B. St 1080/1230; Nennfestigkeitswerte  $\beta_{sN}/\beta_{zN}$ , also 5%-Fraktilenwerte



## SPANNSTAHL DIN 4227

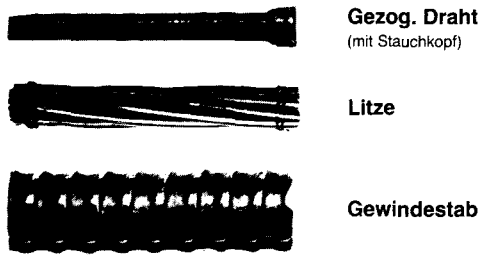


Bild 5.1.32 Einige Spannstahlsorten

lastspielzahlen zu einer eingestellten Kombination  $[\sigma_o; \sigma_o - 2\sigma_A]$  für die zulässige Spannung  $0,55\beta_{ZN}$  als Oberspannung. Die  $2 \cdot 10^6$  mal ertragene Schwingbreite ist die Dauerschwingfestigkeit  $2\sigma_A$ . Rippen und Oberflächenprofilierungen üben eine Kerbwirkung aus und vermindern die Dauerschwingfestigkeit. Beschädigungen der Spannstahloberfläche müssen vermieden werden.

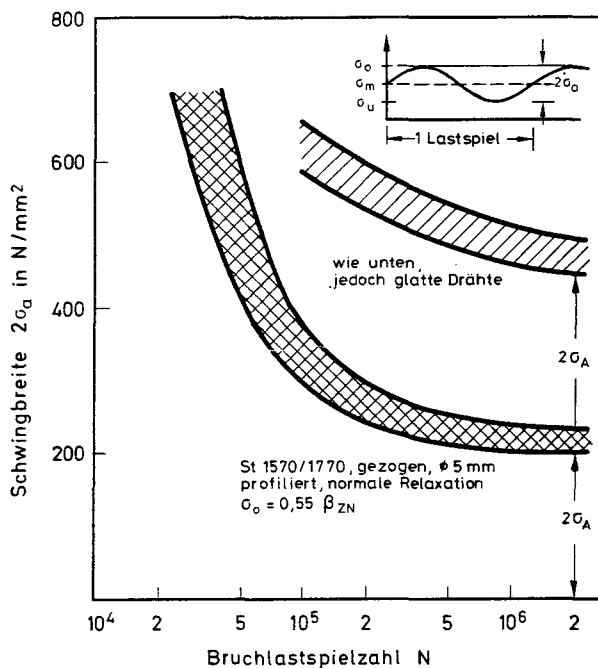


Bild 5.1.33 Wöhlerlinien von gezogenem Spannstahl und Streubänder der Ergebnisse nach [12]

Wählt man eine höhere Oberspannung, z.B.  $0,9\beta_{0,2}$ , so nimmt die Schwingbreite  $2\sigma_A$ , wenn auch nur wenig, ab. Die Abhängigkeit der  $2 \times 10^6$  mal ertragenen Schwingbreite von der Ober- bzw. Mittelspannung kann man in einem Dauerfestigkeitsschaubild auftragen, s. Bild 5.1.34 für glatte Spannstähle. Die Dauerschwingfestigkeit des Spannstahls stellt eine Güteeigenschaft dar. Sie wird innerhalb der Verankerung des Spannglieds durch die Kerbwirkung der Ankerteile meist beträchtlich abgemindert.

Neben dem Vorspannverlust infolge Schwindens und Kriechens des Betons erleidet Spannstahl, der zu Beginn hoch vorgespannt worden war, einen zeitabhängigen Spannungsverlust infolge von Relaxation. Unter Relaxation, bereits in Abschnitt 4.1 angesprochen, versteht man die

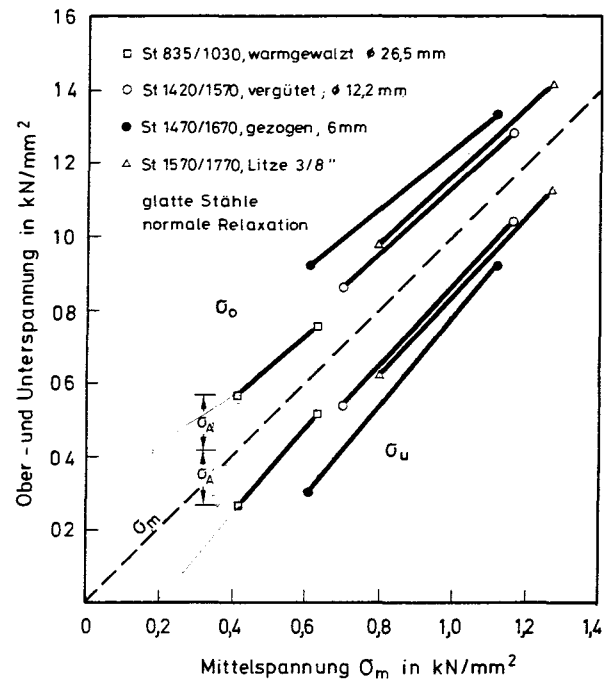


Bild 5.1.34 Dauerfestigkeitsschaubilder nach Smith einiger Spannstahlsorten nach [12]

»Selbstentspannung« bei festgehaltener Ausgangslänge (Vorstellung: Das Spannbetonbauteil stellt ein starres Widerlager für das Spannglied dar). Sie ist die Folge von Platzwechsellvorgängen von Atomen und Gitterdefekten und außerdem thermisch aktivierbar.

Bild 5.1.35 zeigt für einen gezogenen Draht die zeitliche Entwicklung des Relaxationsverlustes. Er steigt mit Zunahme der Anfangsspannung und Temperatur an und nähert sich im Laufe mehrerer Jahre einem Endwert. Der Relaxationsverlust ist auch von der Herstellungsart des Spannstahls abhängig. Die Verluste gezogener Drähte übertreffen die der vergüteten sowie die der warmgewalzten, gereckten und angelassenen Stähle. Durch eine Anlaßbehandlung kann das Relaxationsverhalten gezogenen Stahls beträchtlich verbessert werden. Die in Zulassungen verwendeten Begriffe wie »normale und sehr niedrige Relaxation« stellen Güteermkmale des Relaxationsverhaltens dar.

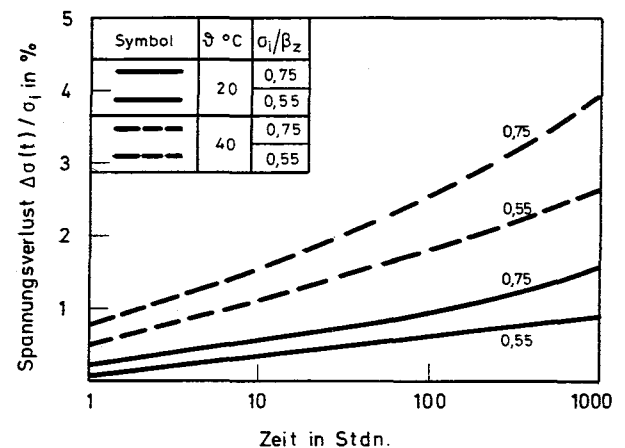


Bild 5.1.35 Relaxationsverhalten von gezogenem und stabilisiertem Draht Ø 7 mm glatt, St 1470/1670 (Beispiel)

Zur Verankerung der Spannstähle müssen diese, in Abhängigkeit vom jeweiligen Spannverfahren, bisweilen kaltverformt etc. werden. Durch Versuche ist nachzuweisen, daß die mechanischen Eigenschaften des Stahls selbst hierdurch nicht wesentlich beeinträchtigt werden. Spannstähle sind mit zunehmender Festigkeit vergleichsweise mehr korrosionsgefährdet als die niederfesten Betonstähle, s. Abschn. 5.3 und 5.7. Der alsbaldige permanente Korrosionsschutz durch Beton oder Einpreßmörtel ist deshalb äußerst wichtig.

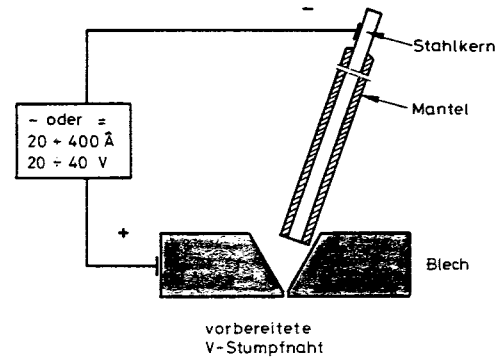


Bild 5.1.36 Lichtbogenschweißen mit Mantelelektrode

## 5.1.6 Zum Schweißen von Stahl

### 5.1.6.1 Begriffe

Der Stahlbau ist ein Montagebau. In der Werkstatt vorbereitete Teile müssen entweder teilweise dort oder auf der Baustelle zum Tragwerk zusammengefügt werden. Die Fügeverfahren umfassen: Nieten, Schrauben, Schweißen und Kleben (s. Stahl im Hochbau und Stahlbaukalender, neueste Ausgaben). Näheres ist der Fachliteratur des Stahlbaus zu entnehmen.

Das wichtigste Fügeverfahren im Stahlbau ist das Schweißen. Durch Schweißen können Werkstücke zu einer festen und unlöslichen Verbindung zusammengefügt werden. Dies erfolgt in der Regel im schmelzflüssigen Zustand. Nach DIN 1910 (die wesentlichen Schweißnormen sind in den DIN-Taschenbüchern [N 13] und [N 14] abgedruckt) unterscheidet man folgende Gruppen:

- a) Preßschweißen ohne Zusatzwerkstoff mit Druckanwendung,
- b) Schmelzschweißen mit Zusatzwerkstoff ohne Druckanwendung.

Das Zusammenfügen durch Schweißen ist die wirtschaftliche und die werkstoffgerechte Verbindung im Stahlbau schlechthin. Da die hohen Temperaturen und die hohen Abkühlgeschwindigkeiten beim Schweißen das Ausganggefüge des Stahls lokal ändern, stellen sowohl die Durchbildung als auch die Ausführung von Schweißkonstruktionen hohe Anforderungen an Ingenieure und Schweißer, um die Sicherheit der Konstruktion zu gewährleisten. Das aufsichtführende Personal und die Schweißer müssen ihr Fachwissen und ihre Befähigung unter Beweis stellen (s. DIN 4100, DIN 8563 u. a.).

### 5.1.6.2 Schmelzschweißverfahren

Die zum Aufschmelzen der Werkstücke und des Zusatzwerkstoffs notwendige Wärme kann auf verschiedene Weise erzeugt werden. Beim Gasschmelzschweißen wird die Verbrennungswärme eines Acetylen-Sauerstoff-Gases genutzt (Autogenschweißen). Die beim Verbrennen von Aluminiumpulver entstehende Wärme wird beim aluminothermischen Schweißen angewandt (Thermitschweißen, -preßschweißen). Die im Lichtbogen entstehende Elektrowärme wird bei der elektrischen Lichtbogenschweißung genutzt, die das wichtigste Verfahren im Stahlbau ist und die hier als einzige besprochen wird.

Die Fügestelle zwischen den zu verbindenden Werkstücken wird nach bestimmten schweißkonstruktiven Regeln vorbereitet. Zwischen der Metallelektrode (Zusatzwerkstoff) und den Werkstücken wird ein Lichtbogen gezündet, s. Bild 5.1.36. Der Grundwerkstoff schmilzt örtlich auf, und die Elektrode schmilzt ab.

Bei der manuellen Lichtbogenschweißung mit sichtbarem Lichtbogen werden üblicherweise Mantelelektroden verwendet. Der Mantel besteht aus Stoffen, die verdampfen und dabei über der Schmelze eine schützende Gashölle bilden. Hierdurch wird das Eindringen von Sauerstoff und Stickstoff der Luft, die beide zur Versprödung führen, verhindert. Die Mantelstoffe erstarren als glasige Schlacke auf der Schmelze, verlangsamen dabei die Abkühlung und schaffen ein feinkörniges Gefüge in der Naht.

Für lange Schweißnähte wurde das automatische Lichtbogenschweißen mit verdecktem Lichtbogen in den Formen der Unterpulver- und Unterschienenschweißung entwickelt. Bei der Unterpulverschweißung wird Schweißpulver kontinuierlich zugeführt und abgesaugt. Die durch das Pulver zugeführte nackte Drahtelektrode brennt im Schutz des Pulvers ab.

Der Zutritt von Luft wird beim Schutzgas-Lichtbogenschweißen durch ein Schutzgas (CO<sub>2</sub>, Argon) verhindert. Die Schweißnaht bleibt beim Entstehen sichtbar und erstarrt porenfrei.

### 5.1.6.3 Preßschweißverfahren

Für den Stahl- und Betonbau hat aus der Vielzahl der Verfahren nur das Widerstandpreßschweißen Bedeutung erlangt (Abbreinstumpf- und Widerstandspunktschweißen).

Beim Widerstandspreßschweißen werden die zu verbindenden Teile an der Kontakt- = Schweißstelle bis in den flüssigen Zustand erwärmt. Die Wärme entsteht durch Ohm'schen Widerstand. Zur Herstellung von Stumpfstoßen von Rund- und Formstählen wurde das Abbreinstumpfschweißen entwickelt. Bild 5.1.37 zeigt schematisch den Aufbau: Die stromdurchflossenen Teile werden erwärmt, an der Kontaktstelle findet das Aufschmelzen statt. Nach ausreichendem Aufschmelzen werden die Teile schlagartig zusammengestaucht.

Zur punktförmigen Verbindung von Blechen oder sich kreuzender Stäbe (Betonstahlmatte) wird das Punktschweißen angewendet, s. Bild 5.1.37. Strom und Kraft werden von Elektroden übertragen.

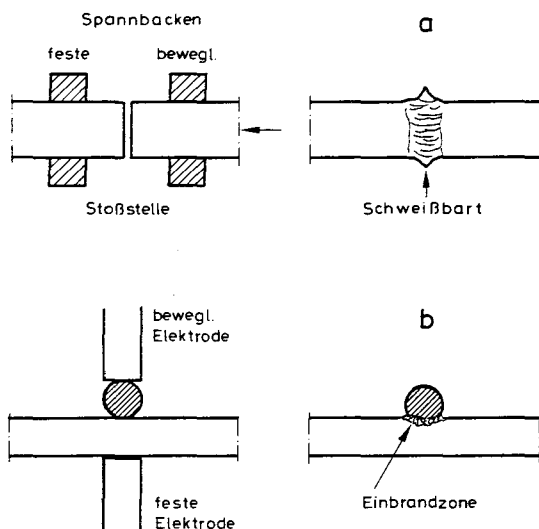


Bild 5.1.37 Abbrennstumpf- (a) und Widerstandspunktschweißung (b)

#### 5.1.6.4 Schweißgefüge

Durch das örtliche Schmelzen des Stahls im Nahtbereich und durch die rasche Wärmeableitung in die Fügeteile entstehen Zonen unterschiedlicher Abkühlgeschwindigkeit und damit unterschiedlichen Gefüges. Innerhalb der Naht, s. Bild 5.1.38, erstarrt die Schmelze (Grund- und Zusatzwerkstoff) mit einem stengeligem Gußgefüge. In Schweißnahtmitte bildet sich eine schmale Seigerungszone. Zu beiden Seiten der Naht schließt sich die Wärmeeinflußzone WEZ an, innerhalb der eine thermische Gefügewandlung erfolgt. Im Bereich 1 sind das Temperaturgefälle und die Abkühlgeschwindigkeit am größten. Es können bei zu schneller Wärmeabfuhr Härtespitzen durch Martensitbildung und Risse entstehen. Die Neigung zur Aufhärtung nimmt mit wachsendem Kohlenstoffgehalt zu, weshalb dieser bei schweißgeeigneten Stählen auf rd. 0,2% begrenzt wird. Durch Überhitzung im festen Zustand bildet sich im Bereich 2 ein Grobkorngefüge hoher Festigkeit oder geringer Zähigkeit. Im Bereich 3 entsteht durch Normalglühen ein verformungsfähiges Feinkorngefüge. In der anschließenden

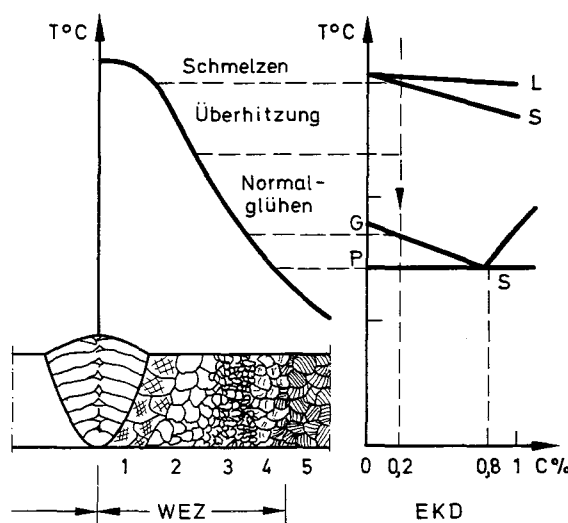


Bild 5.1.38 Schweißgefüge eines Stahls mit 0,2% Kohlenstoffgehalt

den Perlitfallzone 4 wird der lamellare Zementit in Kugelzementit gewandelt, wobei zwar die Verformungsfähigkeit steigt, aber die Festigkeit sinkt. Im Bereich 5 ist das Werkstoffgefüge vom Schweißvorgang im wesentlichen unbeeinflusst geblieben, es sei denn, der Grundwerkstoff ist zuvor kaltverformt worden. Dann tritt im Bereich 5 eine Rekristallisation ein.

Durch Wahl eines schweißgeeigneten Stahls und eines entsprechenden Verfahrens ist es möglich, sowohl die Aufhärtung als auch die Entfestigung in vertretbaren Grenzen zu halten bzw. sogar zu vermeiden.

#### 5.1.6.5 Schweißneigung der Stähle

Die Schweißbarkeit eines Bauteils ist dann gegeben, wenn bei einem gewählten Verfahren und einem bestimmten Fertigungsablauf eine zuverlässige Verbindung erzielt werden kann und wenn die geschweißte Konstruktion den Beanspruchungen sicher standhält. Die Schweißbarkeit hängt von folgenden Einflußgrößen ab: Schweißneigung des Stahls, Schweißsicherheit der Konstruktion und Schweißmöglichkeit der Verbindung (s. DIN 8528 in [N 13]).

Die Schweißneigung eines Stahls ist vorhanden, wenn mit den vom Werkstoff vorgegebenen chemischen, metallurgischen und physikalischen Eigenschaften die Schweißung hergestellt werden kann. Tab. 5.1.11 zeigt die Einflüsse dieser Eigenschaften im Überblick.

Die Eignung eines Stahls zum Schweißen wird im wesentlichen durch dessen Neigung zum spröden Versagen bestimmt. Den größten Einfluß übt der Kohlenstoffgehalt aus, weil bei rascher Abkühlung ab  $C \approx 0,22\%$  das spröde Härtingsgefüge Martensit entsteht. Durch Vorwärmung und kontrollierte Abkühlung kann der Aufhärtung bei höheren Kohlenstoffgehalten begegnet werden. Durch die Elemente Phosphor und Stickstoff wird die zähe Verformbarkeit vermindert, da sie zur Alterungsversprödung führen. Schwefel begünstigt die Warmrißneigung. Die Gehalte an P, N und S dürfen deshalb bestimmte Höchstwerte nicht überschreiten.

Die Vergießungsart des Stahls übt einen großen Einfluß aus. Die Schweißneigung nimmt in der Reihenfolge unberuhigt, beruhigt, besonders beruhigt vergossen zu und wird durch Normalglühen verbessert. Seigerungen verhindern eine zuverlässige metallische Bindung.

Tab. 5.1.11 Abhängigkeit der Schweißneigung von den Werkstoffeigenschaften

Eigenschaften		
chemische	metallurgische	physikalische
Neigung zu Sprödbbruch	Seigerungen	Schmelz- und Erstarrungstemperatur
Aufhärtung	Einschlüsse	Festigkeit und Zähigkeit
Alterung	Anisotropie	therm. Dehnbarkeit
Warmrißneigung	Korngröße	Wärmeleitfähigkeit
	Gefügebildung	

Eine uneingeschränkte Eignung der allgemeinen Baustähle nach DIN 17 100 für alle Schweißverfahren kann nicht zugesagt werden, da die Eigenschaften der Schweißnaht nicht nur vom Werkstoff, sondern auch von anderen Bedingungen abhängen. Die Gütegruppen 2 und 3, s. Tab. 5.1.5, sind im allgemeinen schmelzschweißgeeignet, wobei die Gruppe 3 der Gruppe 2 vorzuziehen ist. Kriterien zur Werkstoffwahl unter dem Blickwinkel »Abwehr vom Sprödbuch« enthält [N 20]. Zur Beurteilung der Sprödbuchunempfindlichkeit bzw. der Schweißbeugung dienen der Aufschweißbiegeversuch [N 2] bzw. die Kerbschlagarbeit [N 4].

Das Schweißen von Betonstabstählen wird zunehmend angewandt. Die Gründe hierfür sind vielfältig: Platz- und stahlsparende Stöße; unverrückbare und wirtschaftliche Montageverbindungen für eine rationalisierte Bewehrungstechnik u. a. Die Herstellung von Stumpfstößen durch die Abbrennstumpfschweißung ist für alle Betonstahlsorten gestattet. Die Herstellung von Überlappings- und Laschenstößen (Kehlnähte) mit der manuellen Lichtbogenschweißung ist gegenwärtig generell nur für den kaltverformten Betonstahl III K erlaubt, der einen Kohlenstoffgehalt  $< 0,2\%$  aufweist [N 11, N 12]. Die künftige Entwicklung zielt jedoch auf die generelle Schweißbarkeit aller Sorten hin. Es wurden bereits mehrere Zulassungen für generell schweißgeeignete Betonstähle der Sorten III und IV erteilt.

Die Ausführung von Schweißarbeiten, die Schweißverfahren und Verbindungen von Betonstählen, ebenso wie die Eignungsprüfungen (Stahl und Schweißer) und Überwachung der Arbeiten usw. werden in E DIN 4099 geregelt. Bild 5.1.39 zeigt einige Verbindungen nach dem Zugversuch; wesentlich ist der Bruch außerhalb der Schweißstelle, rechte Enden. Darüber hinaus sind auch noch Falt- und ggf. Scherversuche erforderlich.

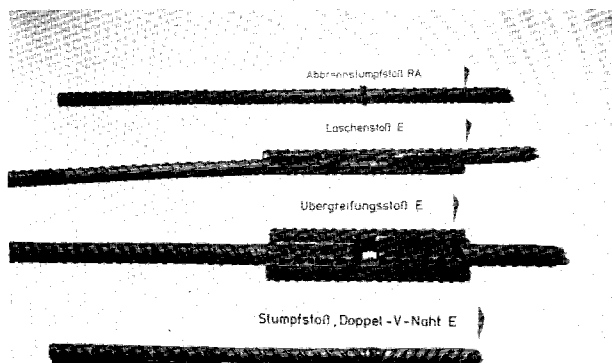


Bild 5.1.39 Schweißverbindungen von Betonstahl

## 5.1.7 Eisengußwerkstoffe

### 5.1.7.1 Begriffe und Einteilung

Die Gußwerkstoffe Stahlguß, Gußeisen und Temperguß gewinnen im Bauwesen, neben traditionellen Anwendungen für Installationsgegenstände u. a., an Bedeutung. Gußstützen hoher Tragfähigkeit werden verwendet, gegossene Verbindungsknoten werden entwickelt. Die wesentlichen Normen sind in [N 16] abgedruckt.

Während Stahlguß einen Kohlenstoffgehalt  $< 0,8\%$  aufweist, liegt dieser für Gußeisen (Grauguß) und Temperguß zwischen 2 bis 4%. Wie Bild 5.1.12 zeigt, liegen auch Unterschiede im Mangan- und Siliziumgehalt vor. Im Stahlguß ist der Kohlenstoff im Zementit des perlitischen Gefüges gelöst. Im Gegensatz dazu fällt der Kohlenstoff bei Grauguß und Temperguß als Graphit aus.

#### 5.1.7.2 Gußeisen mit Lamellengraphit

Dieser Gußwerkstoff ist nach DIN 1691 [N 17] genormt, er umfaßt die Festigkeitsklassen GG-10 bis GG-40 (Zugfestigkeit in  $\text{kp/mm}^2$ ). Der Graphit wird in Lamellenform ausgeschieden. Dies führt wegen der Störung des inneren Spannungsverlaufs (innere Kerbwirkung) zu einer geringen Zugfestigkeit und zu großer Sprödigkeit.

#### 5.1.7.3 Gußeisen mit Kugelgraphit

Dieser Gußwerkstoff ist nach DIN 1693 [N 18] genormt, er umfaßt die Festigkeitsklassen GGG-35 bis GGG-80. Durch Impfung der Schmelze mit Magnesiumkeimen kristallisiert der Kohlenstoff in Form von Graphitkugeln aus. Die Zug- und Schlagfestigkeit sind wegen der geringeren Störung des inneren Kraftverlaufs gegenüber GG erhöht. Gußeisen mit Kugelgraphit wird für eine Reihe von Aufgaben eingesetzt, z. B. für Verbindungsknoten von Raumfachwerken; Tübbings im Tunnelbau u. a. m.

#### 5.1.7.4 Temperguß

Beim sogenannten weißen Temperguß GTW nach DIN 1692 [N 19] wird der graphitfrei erstarrende Temperrohuß einer Glühbehandlung unterworfen, wodurch der Rand des Gußstücks völlig entkohlt wird. Im Innern sammelt sich der Graphit als flockige Temperkohle an. Beim schwarzen Temperguß GTS führt die Glühbehandlung nicht zur Randentkohlung, die Temperkohle ist feinverteilt (Glühbehandlung = Tempern). Temperguß ist ein zäher und schlagfester Werkstoff. Anwendung: Baubeschläge.

#### 5.1.7.5 Stahlguß

Stahlguß ist nach DIN 1681 [N 20] genormt und umfaßt die Sorten GS-38 bis GS-70 (Zugfestigkeit in  $\text{kp/mm}^2$ ). Er ist ein schweißbarer Werkstoff hoher plastischer Verformbarkeit und hoher Schlagzähigkeit. Stahlguß wird unmittelbar und beruhigt in die Gußform vergossen. Anschließend ist eine Kornverfeinerung durch Normalglühen erforderlich. Stahlguß wird für schwierige Verbindungselemente, Beschläge u. a. eingesetzt, wenn es auf hohe Festigkeit und Zähigkeit ankommt (Beispiel: Seilhülsen für Brückenkabel).

## 5.1.8 Normen, Richtlinien

- [N 1] DIN 17200: Vergütungsstähle. Gütevorschriften. 12.69.
- [N 2] DIN 17100: Allgemeine Baustähle, Gütenorm. 01.80.

- [N 3] Stahl und Eisen, Gütenormen, DIN-Taschenbuch 4, Beuth Verlag GmbH., 26. Auflage, 1982.
- [N 4] Materialprüfnormen für metallische Werkstoffe 1. Probenahme, Abnahme, Prüfgeräte, Prüfmaschinen, mechanisch-technologische Prüfverfahren. DIN-Taschenbuch 19, Beuth Verlag GmbH., 9. Auflage, 1982.
- [N 5] Materialprüfnormen für metallische Werkstoffe 2. Physikalische Prüfverfahren, Prüfung von Überzügen, Korrosion, Klima, zerstörungsfreie Prüfverfahren. DIN-Taschenbuch 56, Beuth Verlag GmbH., 2. Aufl. 1979.
- [N 6] SEW 087-70: Wetterfeste Baustähle; Richtlinien für Lieferung, Verarbeitung und Anwendung; 07.70.
- [N 7] DAST-Richtlinie 007: Wetterfeste Baustähle, Lieferung, Verarbeitung und Anwendung; 11.79.
- [N 8] SEW 089-70: Schweißbare Feinkornbaustähle; Gütevorschriften; 07.70.
- [N 9] DAST-Richtlinie: Hochfeste schweißgeeignete Feinkornbaustähle St E 460 und St E 690, Anwendung für Stahlbauten; 02.79.
- [N 10] DIN 17440: Nichtrostende Stähle, Gütevorschriften; 12.72.
- [N 11] DIN 488: Betonstahl. 6 Teile zw. 04.72 und 08.74.
- [N 12] DIN 1045: Beton und Stahlbeton. Bemessung und Ausführung. 12.78.
- [N 13] Schweißtechnik 1, Normen über Schweißzusätze, Fertigung, Güte und Prüfung. DIN-Taschenbuch 8, Beuth Verlag GmbH., 9. Auflage, 1982.
- [N 14] Schweißtechnik 3. Normen über Begriffe, Zeichnerische Darstellung, Schweißverbindungen und elektrische Schweißeinrichtungen. DIN-Taschenbuch 145. Beuth Verlag GmbH., 2. Auflage, 1982.
- [N 15] DAST-Richtlinie 009: Empfehlungen zur Wahl der Stahlgütegruppen für geschweißte Stahlbauten. 1973.
- [N 16] Metallische Gußwerkstoffe. Gütevorschriften, Allgemeintoleranzen, Prüfverfahren. DIN-Taschenbuch 53, Beuth Verlag GmbH., 2. Auflage, 1982.
- [N 17] DIN 1691: Gußeisen mit Lamellengraphit (Grauguß); 08.64.
- [N 18] DIN 1693: Gußeisen mit Kugelgraphit; T 1 10.73; T 2 10.77.
- [N 19] E DIN 1692: Temperguß; Begriff, Eigenschaften; 03.81.
- [N 20] DIN 1681: Stahlguß für allgemeine Verwendungszwecke. Gütevorschriften. 06.67.

### 5.1.9 Literatur

- [1] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile. Bd. 3, Metallische Stoffe, Stahl, Aluminium, Metallkorrosion. Bauverlag GmbH., 1973.
- [2] Bargel, H.-J. und Schulze, G.: Werkstoffkunde. Hermann Schroedel Verlag KG, 1978.
- [3] Domke, W.: Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung. Verlag W. Girardet, Essen, 1969, 3. Auflage.
- [4] Weißbach, W.: Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung. 7. verbesserte Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1979.

- [5] Hornbogen, E.: Werkstoffe. Springer Verlag 1973.
- [6] Reinhardt, H. W.: Ingenieurbaustoffe, Wilh. Ernst & Sohn, 1973.
- [7] Macherauch, E.: Praktikum in Werkstoffkunde. Vieweg-Verlag, Braunschweig, 4. Auflage, 1983.
- [8] Stüwe, H.-P.: Einführung in die Werkstoffkunde. B.I.-Hochschultaschenbücher, Bd. 467, Bibliograph. Institut, 1978.
- [9] Böhm, H.: Einführung in die Metallkunde. B.I.-Hochschultaschenbücher, Bd. 196, Bibliograph. Institut, 1968.
- [10] Heckel, K.: Einführung in die technische Anwendung der Bruchmechanik. Carl Hanser Verlag, München, 1970.
- [11] Stähle für tiefe Temperaturen, Beratungsstelle für Stahlverwendung, Merkblatt 470, 1977.
- [12] Nürnberger, U.: Dauerschwingverhalten von Spannstählen. Bauingenieur 56 (1981), S. 311–319.
- [13] Gefüge und Bruch. Berichte über Fortschritte in der Werkstoffprüfung. Materialkundlich-Technische Reihe 3; Verlag Gebr. Bornträger, 1977.

## 5.2 Nichteisenmetalle

### 5.2.1 Einleitung

Die Nichteisenmetalle (NE-Metalle) werden im Bauwesen, bei im Vergleich zu Stahl und Eisengußwerkstoffen erheblich kleinerer Verbrauchsmenge, in mehreren Teilbereichen eingesetzt. Die wichtigsten NE-Metalle sind Aluminium, Kupfer, Blei und Zink sowie die Legierungen dieser Metalle mit anderen. Gemeinsame Eigenschaft ist die gegenüber ungeschütztem Stahl höhere Beständigkeit gegenüber der Atmosphäre. Das Leichtmetall Aluminium und seine Legierungen werden auch für Ingenieurkonstruktionen und andere beanspruchte Bauteile des Ausbaus eingesetzt. Kupfer, Blei und Zink werden wegen ihres hohen Korrosionswiderstandes vornehmlich für Außenbauteile bzw. für den Korrosionsschutz verwendet.

Die NE-Metalle werden nach der Dichte unterteilt:

- Leichtmetalle mit  $< 4,5 \text{ g/cm}^3$
- Schwermetalle mit  $> 4,5 \text{ g/cm}^3$

### 5.2.2 Aluminium und Aluminiumlegierungen

#### 5.2.2.1 Bautechnische Bedeutung

Das Aluminium und seine Legierungen werden im Bauwesen zunehmend eingesetzt. Diese Tatsache ist auf mehrere günstige Eigenschaften der Aluminiumwerkstoffe zurückzuführen wie z. B.:

- Geringe Dichte von rd.  $2,7 \text{ kg/dm}^3$ , die Gewichtsparsnisse gegenüber Stahlkonstruktionen erlaubt.
- In weitem Bereich einstellbare Festigkeiten bis zu  $600 \text{ N/mm}^2$  bei guter Verformbarkeit.
- Gute Beständigkeit an der Atmosphäre.

- Hohes Reflexionsvermögen für Licht und Wärme.
- Gute Formbarkeit.
- Schweißbarkeit.
- Herstellbarkeit von schützenden und dekorativen Schutzschichten u. a. m.

Diese Eigenschaften haben dem Aluminium im Bauwesen, und zwar sowohl im gestalterischen als auch im konstruktiven Bereich, eine breite Anwendung erschlossen [1], [2].

### 5.2.2.2 Gewinnung

Aluminium ist in seiner Verbindung  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Tonerde) das am weitesten verbreitete Metall der Erdkruste. Der Gehalt an  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ist im Erz Bauxit mit rd. 60% enthalten. Die Gewinnung von Aluminium aus dem Bauxit erfolgt nach dem Bayer-Verfahren. Dabei wird zunächst  $\text{Al}_2\text{O}_3$  durch Auslaugung des Bauxits und durch Brennen gewonnen. Anschließend wird das  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in einer Schmelze aus Kryolith  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  gelöst und hieraus elektrolytisch reduziert. Daneben gibt es noch andere Verfahren zur Elektrolyse des Aluminiumoxids. Durch anschließende Raffination des Hüttenaluminiums kann der Reinheitsgrad erhöht werden. Näheres s. in [1].

### 5.2.2.3 Verfestigungsmethoden

Das Reinaluminium besitzt für die konstruktive Anwendung im Bauwesen eine zu niedrige Festigkeit. Es werden deshalb verschiedene Verfahren zur Verfestigung eingesetzt:

- Legierungshärten
- Ausscheidungshärten von Al-Legierungen
- Kaltverfestigung von Al-Legierungen

#### Legierungshärten

Reinaluminium kristallisiert kubisch-flächenzentriert. Durch Legierungselemente entstehen Substitutionsmischkristalle, die zu einer Festigkeitssteigerung führen. Die wichtigsten Legierungselemente sind: Magnesium, Silizium, Mangan, Zink und Kupfer.

#### Ausscheidungshärten

Das Ausscheidungshärten ist eine Wärmebehandlung. Hierbei wird die Al-Legierung zunächst einem Lösungsglühen unterworfen, wodurch möglichst viel vom Legierungselement im Al-Mischkristall gelöst wird (s. Bild 5.2.1). Darauf folgt durch Abschrecken eine Überführung in den übersättigten Zustand. Durch Auslagerung bei Raum- oder bei erhöhter Temperatur kommt es zu Ausscheidungen aus dem Mischkristall an Korngrenzen und zur Festigkeitssteigerung (Kalt- oder Warmaushärten).

In Abhängigkeit von den Legierungselementen können bei Abkühlung aus der Schmelze stabile Mischkristalle entstehen. Diese sind dann auch beim Lösungsglühen nicht weiter sättigbar und damit auch nicht mehr härtbar: naturharte oder nichtaushärtbare Al-Legierungen. Dementsprechend sind die Legierungen  $\text{AlSi}$ ,  $\text{AlMn}$ ,  $\text{AlMgMn}$  und  $\text{AlMg}$  nichthärtbar, und die Legierungen  $\text{AlCuMg}$ ,  $\text{AlMgSi}$ ,  $\text{AlZnMg}$  und  $\text{AlSiCu}$  sind härtbar.

In Abhängigkeit von der Höhe des Legierungszusatzes unterscheidet man zwischen

- Knetlegierungen (Fremdmetallanteil < 5%) und
- Gußlegierungen (Fremdmetallanteil > 5%).

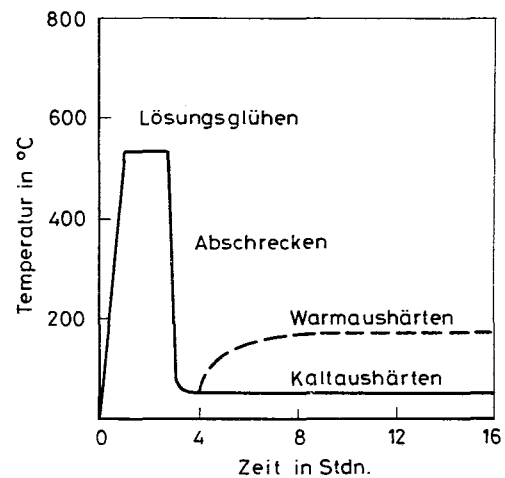


Bild 5.2.1 Ausscheidungshärten einer Al-Legierung

Die Knetlegierungen sind durch spanlose Verformung wie Walzen, Ziehen, Strangpressen u. a. umformbar. Die Gußlegierungen können nur durch Gießen geformt werden. Während der Auslagerung aushärtbarer Legierungen findet der Ausscheidungsprozeß durch Diffusion statt. Durch Warmaushärten zwischen 100 und 200 °C wird dieser Prozeß verstärkt. Bild 5.2.2 zeigt die Veränderung der Festigkeitswerte und der Bruchdehnung in Abhängigkeit von der Auslagerungsart.

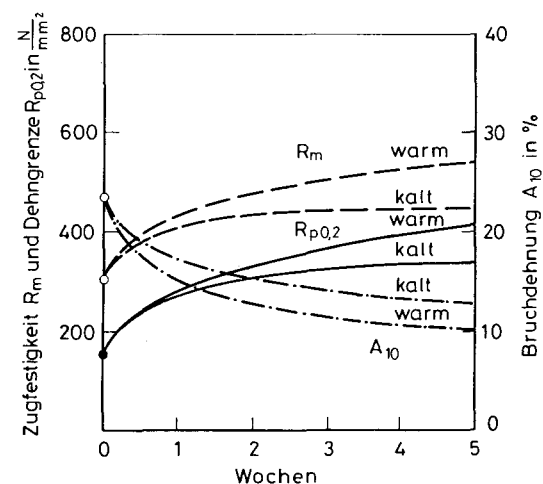


Bild 5.2.2 Einfluß der Aushärtungsart auf Festigkeit und Verformung von Al-Legierungen

#### Kaltverfestigung

Sowohl aushärtbare als auch nichtaushärtbare Al-Legierungen können durch Kaltumformung verfestigt werden. Durch Glühen wird die Festigkeitserhöhung sowohl infolge Ausscheidungshärten als auch infolge Kaltverfestigen wieder rückgängig gemacht.

### 5.2.2.4 Werkstoffarten

Neben Rein- und Reinstaluminium [N 1] werden im Bauwesen Knet- und Gußlegierungen [N 2], [N 4], angewandt. Die Werkstoffe werden mit den Elementsymbolen der Hauptbe-

Tab. 5.2.1 Festigkeitseigenschaften und chemische Zusammensetzung der sechs Regellegierungen nach DIN 4113

Werkstoff- kurzzeichen	Mindest- Zugfestigkeit $R_m$ N/mm <sup>2</sup>	Mindest 0,2-Grenze $R_{p0,2}$ N/mm <sup>2</sup>	Mindest- Bruchdeh- nung $\delta_s$ %	Chemische Zusammensetzung Gewichtsprozent (Rest Aluminium) <sup>1</sup>								Festigkeit durch
				Cu	Mn	Mg	Si	Fe	Zn	Cr	Ti	
AlZnMg1 F 36	360	280	10	< 0,10	0,1 bis 0,5	1,0 bis 1,4	< 0,5	< 0,5	4,0 bis 5,0	0,1 bis 0,25	0,01 bis 0,2	Legieren und Aushärten (aushärtbar)
AlMgSi1 F 32 F 28	320 280	260 200	10 12	< 0,10	0,4 bis 1,0	0,6 bis 1,2	0,75 bis 1,3	< 0,5	< 0,2	0 bis 0,3	< 0,1	
AlMgSi0,5 F 22	220	160	12	< 0,05	< 0,1	0,4 bis 0,8	0,35 bis 0,7	< 0,3	< 0,2	< 0,05	< 0,1	
AlMg 4,5 Mn F 30 F 28	300 280	210 125	10 12	< 0,10	0,6 bis 1,0	1,6 bis 2,5	< 0,40	< 0,40	< 0,2	0 bis 0,3	< 0,1	Legieren und Kaltver- formen (nicht aus- härtbar)
AlMgMn F 23 F 20 F 18	230 200 180	140 100 80	9 10	< 0,10	0,5 bis 1,1	1,6 bis 2,5	< 0,4	< 0,5	< 0,2	0 bis 0,3	< 0,1	
AlMg3 F 23 F 18	230 180	140 80	9 17	< 0,05	0 bis 0,5	2,6 bis 3,4	< 0,4	< 0,4	< 0,2	0 bis 0,3	< 0,1	

1 sonstige nicht aufgeführte Elemente dürfen einzeln mit nicht mehr als 0,05% und zusammen mit nicht mehr als 0,15% vertreten sein

standteile bezeichnet. Folgende Beispiele dienen der Erläuterung:

Al 99,5 H: Reinaluminium 99,5% Al (Hüttenaluminium [N 1])

AlMg3: Knetlegierung mit 3% Mg s. [N 4]

G-AlSi10Mg: Gußlegierung mit 10% Si sowie Mg s. [N 4]

GD-AlSi6Cu3: Druckgußlegierung mit 6% Si und 3% Cu s. [N 4]

Für den konstruktiven Ingenieurbau wurden Regellegierungen nach [N 3] entwickelt, die sowohl aushärtbare und nicht-aushärtbare Werkstoffe umfassen. Sie sind in Tab. 5.2.1 aufgeführt. Durch die nachgestellte Zusatzbezeichnung F.. wird die Mindestzugfestigkeit charakterisiert: Beispiel AlZnMg1F36  $R_m \geq 360$  N/mm<sup>2</sup>. Die Regellegierungen sind schweißbar [2].

Die Werkstoffarten, Querschnittsarten, Festigkeitswerte usw. der verschiedenen Legierungen sind in [N 4] abgedruckt.

### 5.2.2.5 Eigenschaften

#### Physikalische Eigenschaften

Die Dichte von Aluminium beträgt mit 2,7 kg/dm<sup>3</sup> ungefähr ein Drittel der von Stahl. Dies gilt auch für den Elastizitätsmodul:  $E = 70000$  N/mm<sup>2</sup>. Für das Schweißen von Aluminium ist dessen im Vergleich zu Stahl deutlich niedrigere Schmelztemperatur von rd. 660 °C bedeutsam. Die Wärmeausdehnungszahl ist mit  $24 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$  rd. doppelt so groß wie die von Stahl.

#### Mechanische Eigenschaften

Durch die Legierungselemente, durch Ausscheidungshärten und Kaltverformung ist die Festigkeit von Al-Legierungen

gen im weiten Bereich von rd. 50 bis 550 N/mm<sup>2</sup> einstellbar. Die Streckgrenze ist stets nichtausgeprägt und wird deshalb als 0,2%-Dehngrenze angegeben. Mit zunehmender Festigkeit nimmt die Bruchdehnung  $A_{10}$  ab, erreicht jedoch auch bei der Festigkeitsklasse F 52 ( $R_m = 520$  N/mm<sup>2</sup>) noch rd. 10%. Die mechanischen Eigenschaften der Regellegierungen der DIN 4113 sind in Tab. 5.2.1 aufgeführt.

Die Dauerschwingfestigkeit von Schweißverbindungen hängt vom Grundwerkstoff, von der Beanspruchung, von Spannungskonzentrationen (z. B. Einbrandkerben) und von den Schweißparametern ab. Sie wird erst bei  $10^7$  bis  $10^8$  Lastspielen erreicht und liegt i. d. R. deutlich unter der des unverschweißten Grundwerkstoffs.

Bei tiefen Temperaturen steigt die Festigkeit von Aluminium an, aber die Zähigkeitskennwerte nehmen im Gegensatz zu Stahl nicht ab. Auch die Kerbschlagzähigkeit nimmt mit fallender Temperatur nicht ab.

Erhöhte Temperaturen von bereits rd. 150 °C führen zu einer Abnahme der 0,2%-Dehngrenze und der Festigkeit. Die Erweichung erfolgt früher als bei Stahl, weshalb die Forderungen des Brandschutzes bei tragenden Bauteilen schwer erfüllbar sind.

#### Korrosionsverhalten

Ein wesentlicher technischer Vorzug von Aluminium ist dessen Korrosionsbeständigkeit an der Atmosphäre. Sie entsteht durch Bildung einer festhaftenden, dichten Oxidschicht an der Oberfläche, die das darunterliegende Metall schützt und die bei Verletzung von selbst ausheilt.

Salzsäure, SO<sub>2</sub> und Chloride greifen die Oberfläche an und erzeugen Lochfraß und Narben. Von stark alkalischen Medien mit pH > 10 wie Frischbeton, Kalk- und Zementmörtel wird Aluminium angegriffen. Auch bei Berührung mit

Holz, Holzwerkstoffen und mit Holzschutzmitteln wurde Korrosion beobachtet.

Bei Mischkonstruktionen aus einander berührendem Stahl und Aluminium entsteht die Gefahr der Kontaktkorrosion, die durch elektrisch nichtleitende Zwischenschichten unterbunden werden kann (s. Abschn. 5.3).

#### Korrosionsschutz und Oberflächenbehandlung

Ein Korrosionsschutz von Al-Bauteilen, die der Stadt- und Landatmosphäre ausgesetzt sind, kann i. a. entfallen, wenn die Profile offen sind bzw. wenn eine Schwitzwasserbildung ausgeschlossen ist. Die Beständigkeit nimmt mit zunehmendem Reinheitsgrad zu. Besonders beständig ist Rein-aluminium. An Meeresatmosphäre sind v. a. die AlMgMn-Legierungen widerstandsfähig. Die Korrosionsbeständigkeit hängt neben den mechanischen und thermischen Behandlungen auch vom Oberflächenzustand ab. Durch mechanische Glättung der Oberfläche (Schleifen, Bürsten, Polieren) wird die Korrosionsbeständigkeit erhöht. Zur Verbesserung des Korrosionsverhaltens werden verschiedene Oberflächenschutzmaßnahmen angewendet, die nachstehend besprochen werden.

Die natürliche Oxidschicht kann durch chemische Oxidation verstärkt werden. Durch Eintauchen in oder durch Spritzen und Streichen mit Salzlösungen der Chrom- oder Phosphorsäure werden Chromat-, Chromhydrat- oder Phosphatschichten des Aluminiums geringer Dicke gebildet, die die Beständigkeit verbessern und Farbtonungen erzeugen lassen (Chromatieren, Phosphatieren und Bondern). Näheres in [1].

Bei der anodischen Oxidation (elektrolytische Oxidation, Eloxieren) wird die Oxidschicht im Elektrolysebad auf ein Mehrfaches ihrer natürlichen Dicke verstärkt. Der Elektrolyt ist entweder Schwefel- oder Oxalsäure; das Al-Element ist die Anode. Die aufgebaute Schutzschicht, die bis zu 60 µm betragen kann, ist hart, nicht verformbar und bei Verletzung nicht mehr ausheilbar. Die Färbung der Schicht ist einstellbar. Sie besitzt entweder die von den Legierungs- und Begleitelementen beeinflusste Eigenfärbung, oder sie kann nach dem Eloxieren durch Eintauchen in Farben oder durch elektrolytische Behandlung eingefärbt werden. Die mögliche Farbpalette ist sehr breit.

Weitere Möglichkeiten der Oberflächenbehandlung sind: Beizen, organische Beschichtungen und Fremdmetallüberzüge, s. [1].

#### 5.2.2.6 Fügeverfahren

Das Zusammenfügen von Aluminiumbauteilen ist mit allen für Stahl gebräuchlichen Verfahren wie Schrauben, Nieten, Kleben und Schweißen möglich. Für Ingenieurkonstruktionen wird vorwiegend das Schweißen eingesetzt.

Grundsätzlich sind die für das Stahlschweißen gebräuchlichen Verfahren auch für Al-Legierungen einsetzbar. Aluminium verbindet sich mit Luftsauerstoff zu  $Al_2O_3$ , das selbst nicht schmilzt und das die Schweißnaht schwächt. Aus diesem Grund erfolgt das Schweißen in einer Schutzgasatmosphäre, die den Sauerstoff fernhält. Man unterscheidet folgende Schmelzschweißverfahren (Metallschutzgasschweißen nach DIN 1910):

- MIG-Verfahren: Metall-Inertgas (Argon), mit Aluminiumelektrode
- WIG-Verfahren: Wolfram-Inertgas (Argon), mit nicht-schmelzender Wolframelektrode und abschmelzendem Al-Stab.

Nähere Angaben zu diesen und anderen Verfahren enthält [2].

Wie bereits im Abschn. 5.1 beschrieben wurde, schließt zu beiden Seiten der Schweißnaht, die eine Mischung aus Grund- und Zusatzwerkstoff ist, eine Zone an, in der die Vorgänge Rekristallisation und Lösungsglühen durch Schweißwärme stattfinden. Der gesamte, durch Wärme beeinflusste Bereich wird Wärmeeinflußzone WEZ genannt. Bei Aluminiumlegierungen sinkt die Festigkeit in der WEZ stark ab, wobei die Legierungselemente, Nahtgröße, Schweißwärmemenge u. a. m. Einflüsse ausüben. Die Festigkeit von aushärtbaren Werkstoffen wird weniger als die von nichtaushärtbaren vermindert. Bei einer aushärtbaren Legierung kann durch Wärmebehandlung und Auslagerung nach dem Schweißen wieder die ursprüngliche Festigkeit des Grundmaterials erreicht werden. Der durch Kaltverfestigung erzielte Festigkeitszuwachs von nichtaushärtbaren Werkstoffen geht durch Schweißen verloren. Bild 5.2.3 zeigt für eine nicht kaltverfestigte, aushärtbare Legierung den Verlauf der Härte und der Spannungsdehnungslinie entlang der WEZ eines stumpfgeschweißten Blechs.

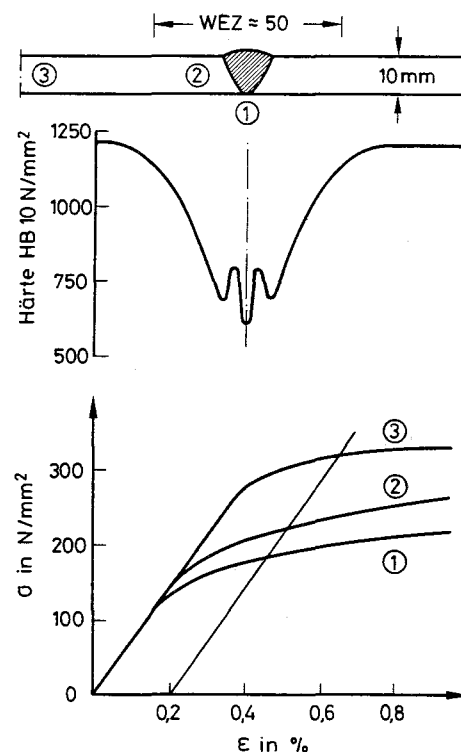


Bild 5.2.3 Härte und Festigkeit in der WEZ einer aushärtbaren AlZnMg-Legierung (Beispiel)

#### 5.2.2.7 Anwendung im Bauwesen

Vereinfacht kann man die Anwendungsbereiche Architektur und Ingenieurbau unterscheiden. Überwiegend werden Knetlegierungen in Form von Halbzeug verwendet: Bleche,



Bänder, Profile unterschiedlichster Querschnittsformen u. a. m. [N 4].

Im Architekturbereich werden Al-Legierungen für Fenster- und Türprofile, für Bedachungen und Fassadenelemente sowie für zahlreiche andere Gegenstände des Innenausbaus verwendet. Für Bedachungen und Fassaden werden beispielsweise die Werkstoffe Al99,5; AlMn, AlMgSi1 u. a. verwendet. Bei höheren Beanspruchungen werden AlMg- und AlMgSi-Legierungen eingesetzt (Näheres s. Aluminium-Merkblätter). Wegen der Vielfalt der angebotenen Werkstoffe ist für den jeweiligen Anwendungsfall zu empfehlen, den Rat der Aluminium-Zentrale e.V. Düsseldorf einzuholen.

Für den Ingenieurbereich stehen die Regellegierungen von DIN 4113 zur Verfügung, deren Einsatz für Schweißkonstruktionen in [2] erläutert wird.

#### 5.2.2.8 Normen, Richtlinien

- [N 1] DIN 1712: Aluminium, Masseln Teil 1, 12.76 und Aluminium, Halbzeug Teil 3, 12.76.
- [N 2] DIN 1745: Bleche und Bänder aus Aluminium und Al-Knetlegierungen, 3 Blätter.
- [N 3] DIN 4113: Aluminiumkonstruktion unter vorwiegend ruhender Belastung. 2 Teile, 2 u. 6.58.
- [N 4] DIN-Taschenbuch 27. Nichteisenmetalle. Aluminium, Magnesium, Titan und deren Knetlegierungen.

#### 5.2.2.9 Literatur

- [1] Aluminium-Taschenbuch. 13. Auflage. Aluminium-Verlag GmbH., 1974.
- [2] Kosteas, D., G. Stidl u. W.-D. Strippelmann: Geschweißte Aluminiumkonstruktionen. F. Vieweg & Sohn, Verlagsges. 1978.

### 5.2.3 Kupfer und Kupferlegierungen

#### 5.2.3.1 Bautechnische Bedeutung

Die bautechnische Bedeutung von Kupfer liegt zum einen in seiner hohen elektrischen Leitfähigkeit und zum anderen in seiner guten Korrosionsbeständigkeit gegen Witterungseinflüsse.

#### 5.2.3.2 Gewinnung

Basis der Gewinnung von Kupfer ist Kupferkies, ein eisenhaltiges Kupfersulfid. Zunächst muß durch Rösten und Schmelzen oder durch chemische Aufbereitung der Schwefel entfernt werden. Das so erzeugte Rohkupfer enthält noch Verunreinigungen, die durch Raffination ausgeschieden werden (Raffinat- und Elektrolytkupfer).

#### 5.2.3.3 Eigenschaften

Kupfer besitzt eine Dichte von rd.  $8,9 \text{ g/cm}^3$ . Seine hohe elektrische Leitfähigkeit wird für Stromleitungen genutzt. Kupfer besitzt eine hohe Korrosionsbeständigkeit an der

Atmosphäre durch Bildung einer passivierenden Schutzschicht (s. Abschn. 5.3). Die Festigkeit von unlegiertem Kupfer ist niedrig, rd.  $200 \text{ N/mm}^2$ ; die Verformbarkeit ist hoch. Durch Kaltverformung und Legierungselemente kann die Festigkeit gesteigert werden.

#### 5.2.3.4 Kupferlegierungen

Im Bauwesen werden im Architekturbereich eine Reihe von Knet- und Gußlegierungen des Kupfers verwendet. Die Legierung des Kupfers mit Zink bezeichnet man als Messing; sie wird nach DIN 17660 nach den Anteilen gekennzeichnet:  $\text{CuZn30} \triangleq 70\% \text{ Kupfer und } 30\% \text{ Zink}$ . Durch das Zink wird eine Festigkeitssteigerung erzielt. Die Anwendung umfaßt Fassadenverkleidungen, Beschläge, Armaturen und Elemente des Innenausbaus. Als Bronzen bezeichnet man die Legierungen des Kupfers mit Zinn (Zinnbronze), Aluminium (Aluminiumbronze) und mit Nickel. Sie werden für ähnliche Aufgaben wie Messing eingesetzt. Die Normen der Cu-Legierungen sind im DIN-Taschenbuch 26 aufgeführt.

#### 5.2.3.5 Anwendung im Bauwesen

Bänder und Bleche werden für Bedachungen, Dachrinnen und Fassadenelemente, Rohre für Gas und Wasserleitungen verwendet. Installationsarmaturen werden mit Kupfer überzogen etc. Des weiteren ist Kupfer das Leitmaterial elektrischen Stroms.

### 5.2.4 Blei und Bleilegierungen

#### 5.2.4.1 Bautechnische Bedeutung

Blei wird im Bauwesen wegen seiner hohen Beständigkeit an der Atmosphäre u. a. als Bedachungsmaterial verwendet. Sein Einsatz in der Haustechnik ist durch Kunststoffe verdrängt worden.

#### 5.2.4.2 Gewinnung

Aus den Bleierzen Weißbleierz  $\text{PbCO}_3$  und Bleiglanz  $\text{PbS}$  werden das Kohlendioxid und der Schwefel durch Rösten ausgetrieben. Hierauf erfolgt die Desoxidation durch Schmelzen. Der Reinheitsgrad wird anschließend durch Raffination bis auf einen Bleigehalt von bis zu 99,9% Pb gesteigert.

#### 5.2.4.3 Eigenschaften

Blei ist mit einer Dichte von  $11,34 \text{ g/cm}^3$  ein sehr dichtes Schwermetall. Sein Schmelzpunkt liegt bei  $327^\circ\text{C}$ . Blei ist an der Atmosphäre und auch gegen zahlreiche Säuren beständig (s. Abschn. 5.3). Es wird durch hochbasische Medien wie Kalkmörtel und durch weiche, kohlensäurehaltige Wasser angegriffen.

Unlegiertes Blei ist sehr duktil und von geringer Festigkeit (rd. 10 bis  $20 \text{ N/mm}^2$ ). Sein E-Modul beträgt rd.  $18000 \text{ N/mm}^2$ . Unlegiertes Blei wird als Weichblei bezeichnet. Durch die Legierungselemente Antimon und Arsen ist eine Festig-

keitssteigerung bis auf 60 N/mm<sup>2</sup> möglich (Hartblei). Die Normen für Blei und Bleilegierung sind im DIN-Taschenbuch 54 abgedruckt (s. DIN 1719 u.a.).

#### 5.2.4.4 Anwendung im Bauwesen

Bänder und Folien von 0,05 bis 12 mm Dicke werden für Bedachungen, Fassadenelemente, als Behälterauskleidungen seltener als Lager für Betonelemente eingesetzt. Bleirohre und Bleirolle (Stemmdichtung) für Abwasserleitungen werden heute kaum noch verwendet. Mit Bleidraht werden Bleiverglasungen angefertigt. Bleioxid (Mennige) wird als ein schützendes Pigment für den Rostschutz im Stahlbau verwendet.

### 5.2.5 Zink und Zinklegierungen

#### 5.2.5.1 Bautechnische Bedeutung

Die bautechnische Bedeutung des Zinks liegt in dessen guter Beständigkeit bei normalen Witterungsbedingungen. Es wird deshalb im großen Umfang für den Korrosionsschutz von Stahlbauteilen (Feuerverzinkung) bzw. für Außenbauteile angewandt.

#### 5.2.5.2 Gewinnung

Die Zinkerze wie Zinkblende ZnS und Zinkspat ZnCO<sub>2</sub> werden bei der Verhüttung geröstet, um das Kohlendioxid und den Schwefel zu entfernen. Dann erfolgt das Ausbrennen des restlichen Sauerstoffs, das verdampfende oder schmelzende Zink wird aufgefangen. Durch anschließende Raffination, z. B. durch Elektrolyse, wird der Reinheitsgrad gesteigert. Nach DIN 1706 (s. DIN-Taschenbuch 54) unterscheidet man nach dem Reinheitsgrad:

Feinzink:	99,9% Zn; als Legierungselement der Bronze z. B.
Hüttenzink:	97,5–99,5% Zn; für Zinkblech
Umschmelzzink:	aus Zn-Schrott; für Feuerverzinkung und als Pigment für Zinkstaubrostschutzfarben

#### 5.2.5.3 Eigenschaften

Die Dichte von unlegiertem Zink beträgt 7,19 g/cm<sup>3</sup>, der Schmelzpunkt rd. 420 °C. Die Wärmeausdehnungszahl ist mit rd. 30 · 10<sup>-6</sup> rd. das Dreifache von Stahl. Festigkeit und Bruchdehnung werden durch Walzen und Pressen auf rd. 100 bis 200 N/mm<sup>2</sup> bzw. auf rd. 30 bis 50% (A<sub>10</sub>) gesteigert. Der E-Modul beträgt rd. 94 000 N/mm<sup>2</sup>. Zink ist an der Atmosphäre bedeutend beständiger als Stahl durch Bildung einer Schutzschicht aus Zn-Carbonat und Zn-Hydroxid, s. Abschn. 5.3, sofern die Luft keine Chloridionen enthält.

#### 5.2.5.4 Zinklegierungen

Die wichtigste Zn-Legierung im Bauwesen ist Titanzink (0,1 bis 0,2% Ti und rd. 1% Cu). Durch Titan wird die Kaltverformbarkeit und Festigkeit gesteigert. Des weiteren wird Zink bei der Zinkbronze, s. Abschn. 5.2.3.4, verwendet.

#### 5.2.5.5 Anwendung im Bauwesen

Zink wird zum Korrosionsschutz von Stahlbauteilen durch Feuerverzinken, galvanische Verzinkung und als schützendes Pigment verwendet. Auch Bewehrungsstäbe können durch Verzinkung rostgeschützt werden. Titanzink kommt für Bedachungen, Regenrinnen u.a. zur Anwendung. Bezüglich Beständigkeit s. Abschn. 5.3.

## 5.3 Korrosion und Korrosionsschutz der Baumetalle

### 5.3.1 Bautechnische Bedeutung

Unter Korrosion faßt man alle jene Zerstörungsprozesse in oder an Baustoffen zusammen, die während der Gebrauchsdauer eines Bauteils durch Reaktionen der Baustoffe unter gemeinsamer Einwirkung der verschiedensten Beanspruchungen hervorgerufen werden. Die Reaktionen können verschiedener Art sein: chemischer, elektrochemischer, physikalischer und mechanischer Art. Auch die Beanspruchungen sind vielfältiger Herkunft, wie beispielsweise: Klima, Chemikalie, mechanische Spannungen u.a. Die Korrosion ist ein natürlicher Vorgang, der aufgrund seiner thermodynamischen Natur in der Regel nicht verhindert, sondern nur mehr oder weniger gehemmt werden kann. Alle Baustoffe besitzen durch die Herstellung einen höheren Energieinhalt als die verwendeten Rohstoffe selbst. Damit sind sie bestrebt, unter Energieabgabe in energieärmere Zustände überzugehen (Beispiel Stahlkorrosion: Erz = Oxide → Energieaufwand → Stahl → Energieabgabe → Rost = Oxide).

Durch Korrosion entstehen hohe volkswirtschaftliche Verluste. Schätzungsweise entstehen jährliche Stahlverluste, die rd. 10% der Roheisenerzeugung ausmachen. Korrosion kann auch zum plötzlichen Versagen von Bauwerken führen, wie der Einsturz der Kongreßhalle in Berlin bewiesen hat.

Diese Gründe haben zu einer eingehenden Erforschung der Korrosionsvorgänge geführt, da erst deren Verstehen die Wahl eines wirksamen Korrosionsschutzes ermöglicht. In diesem Abschnitt können die Grundlagen nur in gedrängter Form behandelt werden. Die in Abschnitt 5.3.8 aufgeführte Literatur bietet vertiefte Kenntnisse [1 bis 11].

### 5.3.2 Begriffe und Unterscheidungen

In der Regel werden Unterscheidungen der Korrosionsart nach dem korrodierenden Stoff getroffen wie Stahl-, Beton- oder Gesteinskorrosion. Einheitliche, baustoffunabhängige Begriffe für die Korrosionsvorgänge sind nicht vorhanden. Da die Metallkorrosion eine größere Bedeutung als die anderer Baustoffe besitzt, hat man hierfür bereits einheitliche Begriffe und Unterscheidungen getroffen, die nach [N 1] genormt sind. Diese werden ebenso wie die für Stahlbauten gültigen [N 2] hier verwendet.

### 5.3.3 Korrosionsbeanspruchungen

#### 5.3.3.1 Vorbemerkungen

Um in korrosionsschutztechnischer Beziehung Entscheidungen für die Werkstoffwahl, konstruktive Durchbildung des Bauteils und die Schutzmaßnahme treffen zu können, müssen die Korrosionsbeanspruchungen, die das Bauteil im Gebrauch erfährt, bekannt oder abschätzbar sein.

Die Beanspruchungen sind vielfältiger Ursache und Herkunft. Die Grenzen zwischen ihnen sind fließend; meist treten mehrere Arten und Ursachen gleichzeitig auf und verstärken oder mildern dabei die Wirkungen. Mechanische Spannungen allein sind keine korrosiven Beanspruchungen. Sie können jedoch einen ungünstigen Grundzustand erzeugen, der die Korrosionsanfälligkeit fördert oder erst schafft.

Für Stahlbauten [N 2] hat man eine Unterteilung der Beanspruchung nach den Umgebungsbedingungen, denen das Bauteil ausgesetzt ist, und nach Sonderbeanspruchungen vorgenommen. Diese Unterteilung besitzt den unmittelbaren Praxisbezug.

#### 5.3.3.2 Korrosionsbeanspruchungen durch die Umgebung

##### a) Atmosphärische Beanspruchungen

Freistehende Bauwerke sind der Witterung ausgesetzt. Die die Korrosionsrate bestimmenden Korrosionsparameter sind:

- relative Luftfeuchte
- Lufttemperatur und Überhöhung durch Sonnenstrahlung
- korrosionsfördernde Stoffe wie  $\text{SO}_2$ , Cl u. a.
- Schmutzpartikel als Schadstoffspeicher

Von besonderer Bedeutung sind Wechsel von Feuchte und Temperatur sowie die Bildung von Kondenswasser auf dem Bauteil.

Lufttemperatur und -feuchte sind die beschreibenden Größen der folgenden Arten des Grundklimas:

- kaltes Klima
- gemäßigtes Klima
- trockenes Klima
- warmfeuchtes Klima
- Meeresklima

Allgemein nimmt die Korrosion mit steigender Temperatur und gleichzeitiger Zunahme der relativen Luftfeuchte ab rd. 65% zu.

Eine genauere Einordnung erlaubt das Makroklima der näheren Umgebung des Bauwerks, dessen Atmosphärentypen in Tab. 5.3.1 gezeigt sind [N 2].

Im Inneren von Gebäuden sind die Beanspruchungen meist gering, es sei denn, daß sich infolge Betriebs besondere Wirkungen ergeben. Letztendlich bestimmt das Mikroklima unmittelbar am Bauteil dessen maßgebende Beanspruchung (Beispiel: Brückengeländer im Tausalznebel).

Die Korrosion wird u. a. durch folgende Stoffe in der Luft beeinflusst. Die Luftkohlenäure  $\text{CO}_2$  hat auf die Korrosion von der freien Atmosphäre ausgesetzten Baumetallen keinen negativen Einfluß. Hingegen spielt das Kohlendioxid, wie später noch gezeigt werden wird, bei der Korrosion von im Beton eingebettetem Stahl eine große Rolle. Schwefel-

Tab. 5.3.1 Einteilung des Makroklimas in Atmosphärentypen

Atmosphärentyp	Kennzeichen
Landatmosphäre (L)	Meist ländliche oder kleinstädtische Gebiete ohne nennenswerte Verunreinigungen an Schwefeldioxid und anderen korrosionsfördernden Schadstoffen
Stadtatmosphäre (S)	Durch Schwefeldioxid und andere Schadstoffe verunreinigte Atmosphäre in dichtbesiedelten Gebieten ohne starke Industrieanstaltungen
Industrieatmosphäre (I)	Stark durch Schwefeldioxid und andere Schadstoffe verunreinigte Atmosphäre, typisch für Ballungsgebiete der Industrie und Bereiche, die in der Hauptwindrichtung solcher Gebiete liegen
Meeresatmosphäre (M)	Vorwiegend durch Chloride verunreinigte Atmosphäre, typisch für das Meer und einen schmalen Küstenstreifen
Die Atmosphärentypen gehen ineinander über, z. B. kann die Meeresatmosphäre bei Industrieanstaltungen an der Küste eine Mischung aus Meeresatmosphäre und Industrieatmosphäre sein	

dioxid  $\text{SO}_2$ , das bei der Verbrennung von Kohle und Öl entsteht, ist sehr korrosionsfördernd und auch für den sauren Regen mit  $\text{pH} \approx 3,5$  bis 5 verantwortlich. Auch Chloride in Küstennähe, als Streusalzlösung und als Luftverunreinigung der Industrieatmosphäre auftretend, sind sehr korrosiv. Schmutz und Staub enthalten und speichern Schadstoffe ebenso wie Feuchtigkeit.

##### b) Korrosionsbeanspruchungen im Boden

Die Korrosionsbeanspruchung eingedrungener Bauteile mit unmittelbarem Bodenkontakt hängt von folgenden Einflüssen [N 3] ab: Chemische und mineralogische Zusammensetzung des Bodens, Wassergehalt, Strömungsgeschwindigkeit des Wassers und Sauerstoffgehalt. Die Aggressivität des Bodens wird von zahlreichen Faktoren bestimmt, siehe [1], die sich bei den verschiedenen Baustoffen unterschiedlich auswirken.

##### c) Korrosionsbeanspruchungen im Wasser

Neben der Art des Wassers – Süßwasser, Brackwasser oder Salzwasser – üben der Sauerstoffgehalt, die Art und Menge der gelösten Stoffe und die Wassertemperatur die wesentlichen Einflüsse aus [N 2].

Bei Bauwerken, die im fließenden Wasser oder im Meer stehen, treten Bereiche mit deutlich unterschiedlichen Sauerstoffgehalten im Wasser auf. Gegenüber der Unterwasserzone weisen die Wasserwechsel- und Spritzwasserzone einen höheren Sauerstoffgehalt auf, was zu einer vergleichsweise stärkeren Korrosion führt. Das Korrosionsverhalten der Baumetalle im Oberflächen-, Grund- und Trinkwasser ist unterschiedlich; Näheres siehe in [1].

d) Korrosionsbeanspruchungen von Stahlbeton und Spannbeton

Wegen der Abhängigkeit von den Baustoffen Beton und Einpreßmörtel werden die Beanspruchungen von im Beton oder Einpreßmörtel eingebettetem Stahl in Abschnitt 5.7 behandelt.

e) Sonderbeanspruchungen

Der Korrosionsvorgang wird durch Sonderbeanspruchungen [N 2] verstärkt. Hierzu gehören chemische Beanspruchungen, mechanischer Abrieb durch Sand, Geschiebe u.a., Kondenswasser, erhöhte Temperaturen u.a.

### 5.3.4 Korrosionsprozeß

#### 5.3.4.1 Vorbemerkungen

Bei der Metallkorrosion sind zwei grundlegend verschiedene Arten möglich. Die chemische Korrosion ist meistens eine Oxidation des Metalls; bei hoher Temperatur reagiert das Metall mit Sauerstoff, und es entsteht Zunder. Die andere Art ist die elektrochemische Korrosion. Sie besitzt für das Bauwesen die erheblich größere Bedeutung als die chemische Korrosion [4, 5].

#### 5.3.4.2 Grundlagen der elektrochemischen Korrosion

##### Voraussetzungen

Die elektrochemische Korrosion beruht auf folgenden Voraussetzungen:

- Es müssen zwei Metallphasen unterschiedlichen elektrochemischen Potentials vorhanden und miteinander metallisch leitend verbunden sein (Ladungsträger: Elektronen im Metall). Diese beiden Metallphasen können auch auf einem Werkstück existieren, weil durch Gefügeunterschiede, Korngrenzen, Seigerungen u.a. Bezirke unterschiedlichen Potentials entstehen können.
- Die Metallphasen müssen von einer leitenden Flüssigkeit, dem Elektrolyten, umgeben sein (Ladungsträger: Ionen im Elektrolyt). Auch Konzentrationsunterschiede im Elektrolyten führen zu einer Potentialdifferenz.

##### Elektrolyt

Ein Elektrolyt ist ein Medium, das Ionen zu leiten vermag. Die Elektrolyte des Bauwesens sind meist wäßrige Lösungen, in denen ein Teil der Moleküle in Ionen aufgespalten, also dissoziiert ist (z.B.  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{OH}^-$ -Ionen u.a. im Regenwasser). Das elektrolytische Leistungsvermögen eines schwachen bzw. starken Elektrolyten hängt von seinem Dissoziationsgrad ab [3].

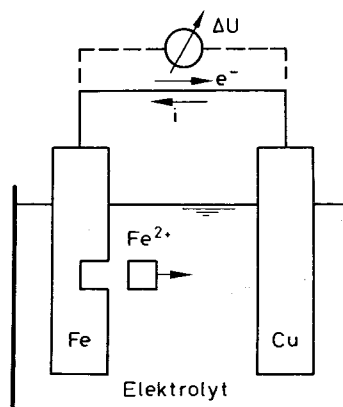
##### Korrosionselement

Die beiden unterschiedlichen Metallphasen und der Elektrolyt bilden, s. Bild 5.3.1, ein galvanisches Element, hier mit Korrosionselement bezeichnet, in dem chemische in elektrische Energie (Gleichstrom) gewandelt wird (Prinzip der Batterie).

Die Metallphasen sind die Elektroden. Die eine Metallphase M 1 bildet die Anode (Pluspol), die andere Phase M 2 die Kathode (Minuspol). Der Gleichstrom tritt an der Anode in

den Elektrolyten aus und wird von den positiv geladenen Kationen  $\text{M}_1^{n+}$  zur Kathode geleitet. Umgekehrt wandern die negativ geladenen Anionen zur Anode (z.B.  $\text{OH}^-$ -Ionen in wäßrigem Elektrolyt).

Welche der beiden Metallphasen zur Anode wird, bestimmt weitgehend der Elektrolyt; die Stellung in der elektrochemischen Spannungsreihe kann dafür nur einen groben Anhalt geben.



Eisen = Anode Pluspol  
Kupfer = Kathode Minuspol

$$\text{Pot. Diff. } \Delta U = E_{\text{OFe}} - E_{\text{OCu}} = -0,44 - 0,34 = -0,78 \text{ V}$$

Bild 5.3.1 Korrosionselement, Beispiel

##### Lösungsdruck und Spannungsreihe

Taucht man ein Metall in einen Elektrolyten, so hat es das Bestreben, seine Atome in Form positiver Kationen in Lösung zu geben. Die treibende Kraft des Auflösungsbestrebens nennt man Lösungsdruck, der von der Bindungsenergie der Atome im Gitter abhängt, also eine Stoffeigenschaft ist. Je unedler ein Metall ist, um so größer ist sein Auflösungsbestreben. Die Begriffe »edel« und »unedel« kennzeichnen die Sauerstoffaffinität der Metalle: edle Metalle wie Gold kommen in der Natur gediegen vor, unedle Metalle wie Aluminium hingegen nur als chemische Verbindung mit Sauerstoff, z.B. als  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Zur Kennzeichnung des Auflösungsbestrebens der Metalle dient die elektrochemische Spannungsreihe, s. Tab. 5.3.2, in der die Metalle von oben nach unten mit abnehmendem Auflösungsbestreben geordnet sind. Die Spannungsreihe gibt einen ungefähren Anhalt dafür, welches von zwei Metallen in einem Elektrolyten gelöst, also bevorzugt zerstört wird: Dasjenige der beiden Metalle, das negativer ist, wird zur Anode und aufgelöst.

Die Standardpotentiale  $E^0$ , erste Spalte von Tabelle 5.3.2, wurden in einer Zelle mit schwach saurem Elektrolyten bestimmt. Als die eine Elektrode wird das Metall, z.B. Eisen, als die andere die sog. Standardwasserstoffelektrode gewählt. Die Zellspannung zwischen den Elektroden ist die Potentialdifferenz  $E^0$  in Volt. Sie beträgt für Eisen gegen Wasserstoff  $-0,44 - 0 = -0,44 \text{ V}$ . Dies bedeutet: Das Eisen wird Anode eines elektrochemischen Elements, an der  $\text{Fe}^{2+}$  in Lösung geht.

Das Verhalten von zwei Metallen, hier Eisen und Kupfer, in einem Korrosionselement zeigt Bild 5.3.1. Das unedlere Eisen wird zur Anode und aufgelöst, das Kupfer bleibt intakt.

Tab. 5.3.2 Elektrochemische Spannungsreihen  
(gegen Wasserstoffelektrode)

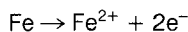
Metall	gebildetes Kation	Standard-potential $E^0$	praktisches Potential $E_H$ bei		
		V	pH = 6	pH = 7,5	
Magnesium	$Mg^{2+}$	- 2,34			↑ unedel abnehmender Lösungsdruck ↓
Titan	$Ti^{2+}$	- 1,75	+ 0,2	- 0,1	
Aluminium	$Al^{3+}$	- 1,67	- 0,2	- 0,7	
Zink	$Zn^{2+}$	- 0,76	- 0,8	- 0,3	
Chrom	$Cr^{3+}$	- 0,71	- 0,2	- 0,3	
Eisen	$Fe^{2+}$	- 0,44	- 0,4	- 0,3	
Nickel	$Ni^{2+}$	- 0,25	+ 0,1	+ 0,04	
Zinn	$Sn^{2+}$	- 0,14	- 0,3	- 0,8	
Blei	$Pb^{2+}$	- 0,13	- 0,3	- 0,2	
Wasserstoff	$H^+$	0			
Kupfer	$Cu^{2+}$	+ 0,34	+ 0,2	+ 0,1	↑ edel ↓
Silber	$Ag^+$	+ 0,80	+ 0,2	+ 0,15	
Platin	$Pt^{2+}$	+ 1,20			
Gold	$Au^+$	+ 1,68	+ 0,3	+ 0,2	

#### Teilprozesse

Bei der elektrochemischen Korrosion laufen zwei Teilprozesse gleichzeitig ab: Anodischer und kathodischer Teilprozeß. Diese Prozesse werden am Beispiel des Rostens von Eisen erläutert.

##### a) Anodischer Teilprozeß

Die Eisenatome auf der Werkstoffoberfläche haben das Bestreben, sich mit Sauerstoff zu verbinden (Oxidation). Hierzu ist es zunächst erforderlich, daß einzelne, in sich elektrisch neutrale Eisenatome ihre Valenzelektronen an das Metall abgeben und als Kationen  $Fe^{2+}$  in den Elektrolyten treten. Der Bereich der Oberfläche, an dem die Metallauflösung stattfindet, ist die Anode; man spricht deshalb von anodischer Metallauflösung, die durch die Brutto-Reaktionsgleichung



beschrieben wird, s. Bild 5.3.2. Die Anode ist im Vergleich zu anderen Bereichen der Oberfläche ein unedlerer Bereich.

##### b) Kathodischer Teilprozeß

Das korrodierende oder korrodierte Werkstück ist nach außen elektrisch neutral. Damit müssen die an das Metall abgegebenen Elektronen im kathodischen Teilprozeß an der Kathode verbraucht werden. Dabei sind – abhängig vom Elektrolyten – folgende Reaktionen möglich:

##### b1) Sauerstoffreduktion im sauren Elektrolyten pH < 7

Hierbei verbindet sich im Elektrolyten gelöster Sauerstoff

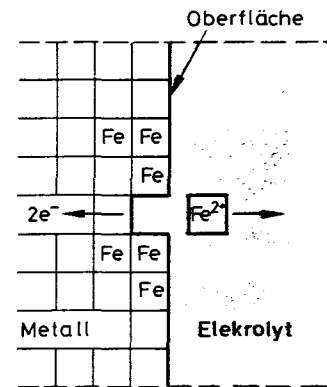
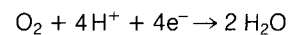


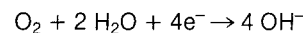
Bild 5.3.2 Anodischer Teilprozeß und anodische Metallauflösung

unter Elektronenverbrauch mit den reichlich vorhandenen Wasserstoffionen zu Wasser:



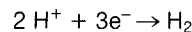
##### b2) Sauerstoffreduktion im neutralen bis alkalischen Elektrolyten pH $\geq 7$

Hierbei werden  $OH^-$ -Ionen aus Sauerstoff und Wasser unter Elektronenverbrauch erzeugt:



##### b3) Wasserstoffabscheidung

Hierbei wird molekularer Wasserstoff gebildet, der als Gas entweicht:



Bei der Korrosion laufen die anodische Metallauflösung und eine oder mehrere der kathodischen Reaktionen gleichzeitig ab. Wird die kathodische Reaktion be- oder verhindert, wird die Korrosion verlangsamt oder zum Stillstand gebracht. Die Vorgänge an der Kathode bestimmen meist die Korrosionsgeschwindigkeit (Abtragrate, Narbentiefenrate).

#### Korrosionstypen

Die Mehrzahl der Elektrolytlösungen im Bauwesen (Meerwasser, Regen, Oberflächenwasser) liegt im schwach sauren bis alkalischen Bereich. In diesem Bereich übt der Sauerstoffgehalt des Elektrolyten (Zufuhr, Belüftung) einen bestimmenden Einfluß aus. Es laufen die Reaktionen anodischer Auflösung und Sauerstoffreduktion b2 mit  $OH^-$ -Ionenbildung ab. Diesen Vorgang nennt man Sauerstoffkorrosionstyp. Die Korrosion nimmt mit Zunahme des Sauerstoffgehalts und der Temperatur des Elektrolyts zu. Der Schutz besteht im Fernhalten von Sauerstoff durch eine dichte Umhüllung (Beschichtung). Bild 5.3.3 zeigt den Sauerstoffkorrosionstyp, der für das Rosten von Eisen maßgebend ist, unter einem Wassertropfen (Belüftungselement). In stark sauren Medien mit pH < 4 laufen Teilreaktionen anodischer Metallauflösung und Wasserstoffabscheidung ab. Diesen Vorgang nennt man Wasserstoffkorrosionstyp. Er tritt vor allem bei metallischen Überzügen auf, wobei die unedlere Metallphase angegriffen wird. Bild 5.3.4 zeigt als Beispiel hierfür die abtragende Korrosion des unedleren Zinks an einer mechanischen Verletzung des Zinküberzugs auf einem Stahlblech.

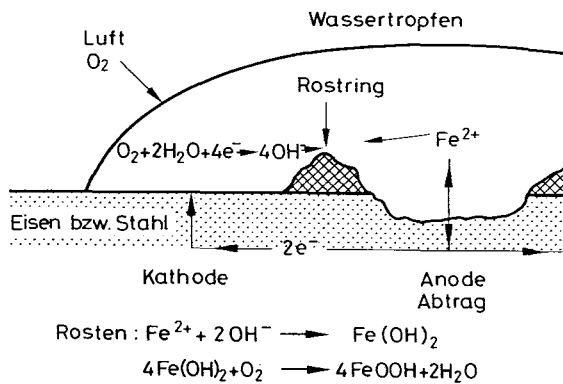


Bild 5.3.3 Sauerstoffkorrosion von Eisen bzw. Stahl

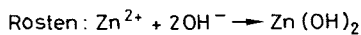
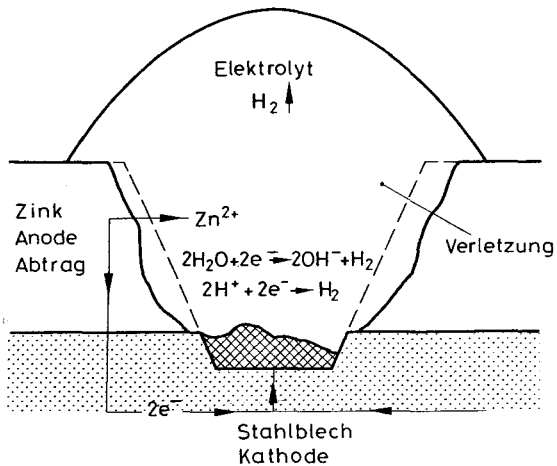


Bild 5.3.4 Wasserstoffkorrosion beim verzinkten Stahlblech an einer Verletzung der Zinkschicht

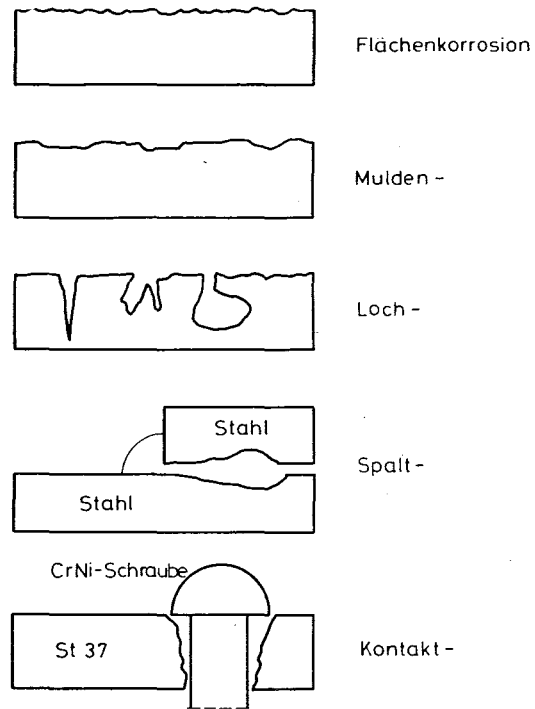
#### Passivität

Die Korrosion von Eisen nimmt ab pH > 9,5 deutlich ab. Ursache hierfür ist die Bildung einer dichten porenfreien Deckschicht, der sog. Passivschicht, die den Übergang der Metallionen in den Elektrolyten verhindert. Wie später noch gezeigt werden wird, ist dieser Umstand für den Korrosionsschutz einbetonierter Stähle und für das Korrosionsverhalten der nichtrostenden Stähle und einiger NE-Metalle von Bedeutung.

#### 5.3.4.3 Arten und Erscheinungsformen

##### Gleichmäßige Flächenkorrosion und Muldenkorrosion

Bei der Flächenkorrosion erfolgt der Abtrag gleichmäßig, bei der Muldenkorrosion entstehen muldenförmige, flache Vertiefungen. Diese Formen des Abtrags spiegeln die relative Größe der anodischen Bereiche im Vergleich zu den kathodischen Bereichen wider. Die Abtragungsrate dieser Korrosionsraten ist relativ gering und wird durch anhaftende Korrosionsprodukte (Rost) gehemmt. Dementsprechend geht die Querschnittsschwächung eines Bauteils relativ langsam vor sich. Wegen der guten Erkennbarkeit dieser Korrosionsarten sind Gegenmaßnahmen vor dem Bauteilversagen möglich. Bild 5.3.5 zeigt die Erscheinungsformen; sie sind für die atomosphärische Korrosion von Bauplasten typisch.



Beispiele; Korrosionsprodukte sind nicht dargestellt

Bild 5.3.5 Formen der anodischen Korrosion

#### Lochkorrosion

Die Lochkorrosion läuft in kleinen Oberflächenbereichen ab und erzeugt kraterförmige, nadelstichtartige Vertiefungen und Unterhöhungen; Lochfraß. Die Lochkorrosion wird an Verletzungen oder Fehlstellen von Deckschichten (edlerer Fremdmittelüberzug, Passivschicht, Zunder- und Rostschicht u. a.) und bei lokaler Beanspruchung durch ein Korrosionsmittel beobachtet. Es bildet sich ein Lokalelement, an dem eine kleine Anode einer sehr großen Kathode, eben der Deckschicht, gegenübersteht. Dementsprechend steigt die Dichte des anodischen Teilstroms an, wodurch eine starke lokale, anodische Metallauflösung erzeugt wird. Die entstehenden tiefen Kerben können zu einem vorzeitigen und zum unangekündigten Versagen eines Bauteils führen (s. Bilder 5.3.5 und 5.3.6).

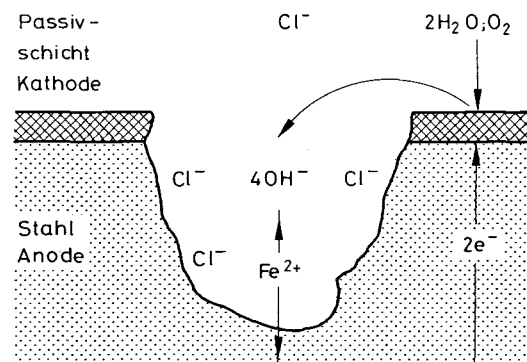


Bild 5.3.6 Lochfraß durch Chloridkorrosion

Die Lochkorrosion besitzt in der Form der Chloridkorrosion eine große Bedeutung im Bauwesen. Chloridionen im Elektrolyten können die Passivschicht z. B. eines einbetonierten

Bewehrungsstahls oder eines Blechs aus nichtrostendem Stahl durchbrechen. Am Grund des Kraters stellt sich im Elektrolyten durch Hydrolyse der als erste entstandenen Eisenchloride ein niedrigerer pH-Wert ( $H^+$ -Überschuß) als an der Oberfläche ein, und die Konzentration an Chloranionen nimmt durch Überführung zu. Damit bleibt die Korrosion aktiv, und die Narbentiefe wächst.

#### Belüftungselement und Spaltkorrosion

Örtliche Konzentrationsunterschiede im Elektrolyten führen auch bei nur einer Metallphase zu einem Korrosionselement. Von Bedeutung ist der unterschiedliche Zutritt von Sauerstoff zum Elektrolyten, der unterschiedliche Gehalte an Sauerstoff bewirkt. In diesem Fall entsteht ein sogen. Belüftungselement, das am Beispiel des Wassertropfens in Bild 5.3.3 bereits gezeigt wurde:  $O_2$ -Verarmung an der Anode gegenüber höherem  $O_2$ -Gehalt im übrigen Bereich. Ein im Bauwesen häufiger Fall ist die Spaltkorrosion, die an konstruktiv bedingten Spalten von Verbindungen (die Schweißverbindung ist deshalb der Schraubverbindung in korrosionsschutztechnischer Hinsicht überlegen), an Rissen in Beschichtungen (Unterwanderung), unter Ablagerungen usw. auftritt (s. Bild 5.3.5). Die Sauerstoffkonzentration nimmt mit Zunahme der Spalttiefe ab, die Spaltkorrosion setzt an Stellen niedriger  $O_2$ -Konzentration ein. Auch in einem Spalt zwischen einem Metall und einem nichtelektronenleitenden Stoff (z. B. Kunststoff) kann es zu Spaltkorrosion kommen.

#### Kontaktkorrosion

Die Kontaktkorrosion entsteht zwischen zwei Metallen, die unterschiedliche Potentiale aufweisen. Sie ist um so heftiger, je weiter die Metalle in der Spannungsreihe auseinanderliegen. Das unedlere Metall wird Anode und angegriffen. Diese Korrosionsart tritt in der Praxis an Verbindungsstellen bzw. -mitteln häufig auf (s. Bild 5.3.5).

#### Spannungsrißkorrosion

Bei den zuvor beschriebenen Korrosionsarten werden Vorgang, Fortschritt und Erscheinungsform der Korrosion nur von den elektrochemischen Teilprozessen bestimmt und sind von den im Bauteil herrschenden mechanischen Spannungen unabhängig. Im Gegensatz dazu ist zur Entstehung der Spannungsrißkorrosion (SpRK) das Vorliegen von hohen mechanischen Spannungen eine zusätzliche Bedingung. Hierbei kann es sich sowohl um von außen aufgebrachte Spannungen als auch um Eigenspannungen infolge von Kaltverformung, Härtung o. a. handeln.

Bei der Spannungsrißkorrosion entwickeln sich Risse von der Oberfläche des Werkstoffs aus, die sich entweder durch die Kristallblöcke hindurch (transkristalliner Bruch) oder zwischen den Kristallblöcken, also entlang der Korngrenzen (interkristalliner Bruch), fortpflanzen und die zu einem verformungslosen Spröbruch führen können (siehe Bild 5.3.7). Gerade in dieser Bruchart, die ohne äußere Vorwarnung eintreten kann, liegt die bautechnische Bedeutung der Spannungsrißkorrosion für die Bauteilsicherheit [5, 6].

Man unterscheidet folgende Arten der SpRK, wobei andere in der Fachliteratur gebräuchliche Bezeichnungen in Klammern aufgeführt werden:

a) anodische Spannungsrißkorrosion,

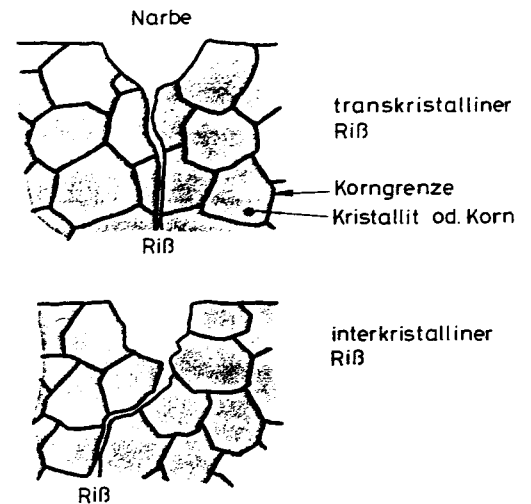


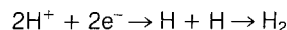
Bild 5.3.7 Rißverlauf bei Spannungsrißkorrosion

b) kathodische Spannungsrißkorrosion (Wasserstoffversprödung, wasserstoffinduzierte SpRK, Wasserstoffrißkorrosion).

Für das Auftreten der Spannungsrißkorrosion müssen folgende Voraussetzungen vorliegen:

- Zugspannungen im Bauteil/-stoff,
- Korrosionsmittel bzw. Elektrolyt spezifischer Art,
- Werkstoffempfindlichkeit (Zusammensetzung und Zustand),
- Passivzustand.

Die anodische Spannungsrißkorrosion tritt erfahrungsgemäß nur an Metallen mit Passivschicht auf, wenn diese lokal durchbrochen wird. Hierbei kommt es zur Bildung eines Lokalelements und zur lochfraßartigen Anfressung der Oberfläche, die eine rißauslösende, scharfe Kerbe darstellt (anodische Auflösung im Rißgrund). Die Zerstörung der Passivschicht wird durch im Elektrolyten gelöste Korrosionsmittel wie Chloride und Nitrate oder durch einen Wasserstoffionenüberschuß (saure Lösung) erzeugt. Schäden infolge anodischer SpRK wurden an nichtrostenden Stählen in Meeresatmosphäre und an Bewehrungsstählen in Spannbetonträgern in Viehställen (Nitrate) festgestellt. Die kathodische Spannungsrißkorrosion hängt unmittelbar mit der beim kathodischen Teilprozeß ablaufenden Wasserstoffabscheidung und mit der Rekombinationsreaktion von atomarem zu molekularem Wasserstoff zusammen [5]:



Durch bestimmte Wasserstoffverbindungen von Schwefel, Phosphor, Arsen u. a. sowie durch Cyanide, Rhodanide u. a. wird die Rekombination des Wasserstoffs im Elektrolyten zu molekularem  $H_2$ , das als Gas hochsteigt, gehemmt. Diese die Wasserstoffadsorption auf der Stahloberfläche fördernden Stoffe werden als Promotoren bezeichnet. Der atomare Wasserstoff vermag dann als Nebenreaktion ins Metallgefüge einzudiffundieren und dort an inneren Oberflächen zu rekombinieren, womit eine hohe Gasdruckentwicklung verbunden ist.

Die Einlagerung (Absorption) des Wasserstoffs erfolgt an Störstellen des Gefüges, z. B. an Versetzungen, Korngren-

zen, Mikrorissen u. a. Dabei werden das plastische Verformungsvermögen sowie die Trennfestigkeit des Werkstoffs vermindert, und es entsteht unter den angelegten mechanischen Spannungen die Gefahr eines zeitlich verzögerten Sprödbruchs.

Wegen der Bedeutung der Spannungsrißkorrosion im Massivbau [6, 10] wird auf sie im Abschnitt »Beton« erneut eingegangen.

Abschließend sei noch die sogen. Schwingungsrißkorrosion (Korrosionsermüdung) erwähnt, die eine Rißkorrosion unter schwingender Beanspruchung ist. Durch gleichzeitigen Korrosionsangriff wird die Schwingfestigkeit z.B. von hochfesten Stahldrähten reduziert.

#### Korrosionsprüfungen

In Korrosionsprüfungen [N 6] wird die Beständigkeit von metallischen Werkstoffen, von Überzügen und Beschichtungen untersucht. Man versucht dabei, die Korrosionsbedingungen im Versuch den praktischen Beanspruchungen anzupassen, gleichzeitig aber durch Zeitraffung auf das Langzeitverhalten zu schließen.

### 5.3.5 Korrosionsverhalten der wichtigsten Baumetalle an der Atmosphäre

#### 5.3.5.1 Vorbemerkungen

Unter atmosphärischer Korrosion versteht man die Gesamtheit der Korrosionsvorgänge, die an metallischen Baustoffen im Freien (Außen- und Innenklima) ablaufen. Dabei können je nach Gegebenheit sämtliche Korrosionsarten vorkommen. Auf die Korrosion in Böden und Wässern kann bestenfalls hingewiesen werden, sofern Gemeinsamkeiten zur atmosphärischen Korrosion vorhanden sind.

#### 5.3.5.2 Verhalten der Baustähle

Für die abtragende Korrosion der Baustähle sind Feuchtigkeit und Sauerstoff erforderlich. Die Feuchtigkeit (Elektrolyt) wird durch Niederschlag bzw. durch Kondensatfilme geliefert. Man hat festgestellt, daß die kritische relative Luftfeuchte, ab der Rostbildung einsetzt, rd. 65% beträgt. Die Rostbildung nimmt bei gleichzeitiger Zunahme von Luftfeuchte und -temperatur zu. Die Zusammensetzung der Luft ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{NO}_2$ , Salze, Schmutz, Ruß u. a.) ist, wie Bild 5.3.8 zeigt, von großem Einfluß, der aber erst ab rd. 65% r. f. wirksam wird [4].

Die Luftverschmutzungen äußern sich im pH-Wert des Elektrolyten. In Großstädten und Industriegebieten hat man im Regen pH-Werte von bis 3 gemessen. Bild 5.3.9 zeigt schematisch die Korrosion von Stahl abhängig vom pH-Wert und vom Sauerstoffgehalt des Elektrolyten (wäßrige Lösung ohne Salze). Ab  $\text{pH} < 4$  setzt bei ausreichendem Sauerstoffangebot eine heftige Korrosion mit Wasserstoffentwicklung ein. Im alkalischen Elektrolyten mit  $\text{pH} > 9$  bis 9,5 findet keine Stahlkorrosion statt, da sich der Stahl passiviert.

Das Korrosionsprodukt Rost besteht aus voluminösen Eisenoxid-Hydroxiden, bei mit Schwefeldioxid verunreinigter Luft enthält der Rost auch noch Eisensulfat. Der Rost bildet

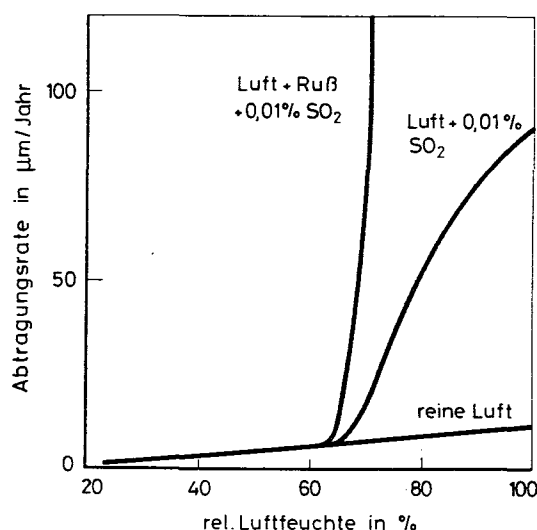


Bild 5.3.8 Einfluß der rel. Luftfeuchte und von Luftverunreinigungen auf die Korrosion von unlegiertem Baustahl (aus [4])

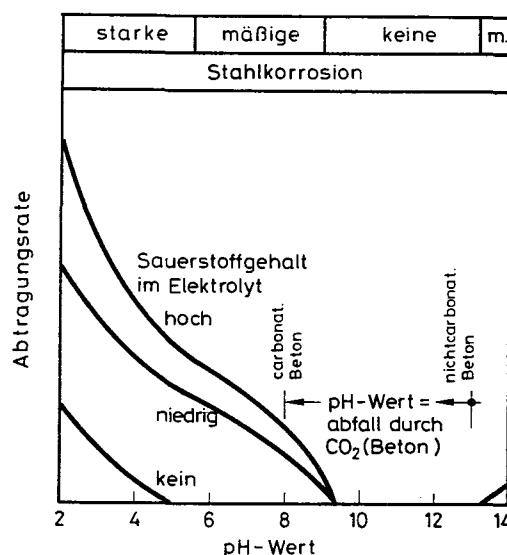


Bild 5.3.9 Abhängigkeit der Abtragungsrate der Stahlkorrosion an der Atmosphäre und im Beton vom Sauerstoffgehalt und pH-Wert (schematisch)

eine mäßig haftende Deckschicht, die nicht dicht ist und damit auch keinen Schutz bietet. Das Korrosionsverhalten von Stählen wird in Auslagerungsversuchen untersucht. Dabei wird der Massenverlust von Stahlplatten abhängig von der Auslagerungszeit bestimmt. Der Massenverlust kann auch als Abtragung in  $\mu\text{m}$  ( $1 \mu\text{m} = 1/1000 \text{ mm}$ ) oder als Abtragungsrate (pro Jahr) ausgedrückt werden. Erwartungsgemäß ist die Bandbreite der Ergebnisse sehr groß. Bei flach auslagernden Platten ist der Massenverlust der direkt bewitterten Oberseiten doppelt so groß wie die der Unterseiten.

Bild 5.3.10 zeigt den Einfluß des Klimas auf die Korrosion von unlegiertem Baustahl. Die Korrosion ist in Industrieluft am größten. Die Korrosion in Meeresatmosphäre hängt vom Abstand vom Meer ab. Meerwasser ist wegen seines hohen Gehalts an gelösten Salzen (3% Chloride und Sulfate) sehr stahlaggressiv. Durch die Brandung gelangt Meerwasser in aerosoler Form (kleinste Flüssigkeitsteilchen) in die Luft und



Tab. 5.3.3 Abtragungsraten einiger Baumetalle abhängig vom Atmosphärentyp (verschiedene Quellen)

Baustoff	Landatmosphäre	Stadtatmosphäre	Industrieatmosphäre	Meeresatmosphäre
	$\mu\text{m/a}$	$\mu\text{m/a}$	$\mu\text{m/a}$	$\mu\text{m/a}$
Baustahl nach DIN 17 100	10–65	30–70	40–170	20–200
wetterfester Baustahl	5–10	5–15	10–30	10–40
Zink	2–4	2–8	8–20	3–15
Kupfer	< 0,5	1–2	1–5	1–2
Aluminiumlegierungen	< 0,1	0,1–1	1–3	1–2
Blei	< 0,3	0,3–1	0,5–2	0,5–1

damit als Niederschlag auf die Bauteile. Die Meereseinfluß nimmt mit zunehmender Entfernung vom Meer ab, ab rd. 2 km ist er verschwunden. Bei unmittelbar im Meer stehenden Bauteilen kann der Massenverlust das Zwei- bis Dreifache von Kurve 2 betragen, vor allem in der Wasserwechsel- und Spritzwasserzone. Tabelle 5.3.3 gibt einen Überblick über Abtragungsraten in unterschiedlichen Atmosphären.

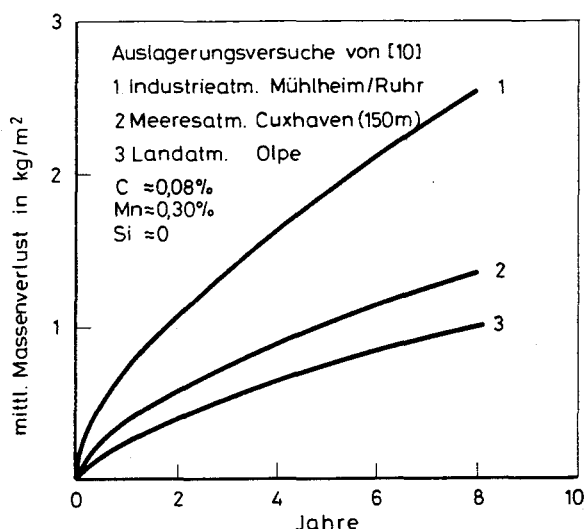


Bild 5.3.10 Massenverlust infolge Korrosion von unlegiertem Baustahl abhängig von Zeit und Atmosphärentyp

Die Abtragungsrate wird von der Zusammensetzung und Vergießungsart des Stahls beeinflusst. Bild 5.3.11 zeigt beispielhaft, daß durch geringe Kupfer- und Chromzugaben die Abtragungsrate vermindert wird. Diese Erkenntnis wird bei den wetterfesten Baustählen (Abschnitt 5.1) genutzt und beruht auf der Bildung von dichten, festhaftenden und schwerlöslichen Oxid- und Sulfatschichten (Passivierung). Unberuhigt vergossene Stähle rosten mehr als mit Silizium beruhigte. Die Korrosion nimmt mit steigendem Phosphor- und Schwefelgehalt zu.

### 5.3.5.3 Verhalten der nichtrostenden Stähle

Die nichtrostenden Stähle sind durch hohe Legierungsgehalte von Chrom, Nickel und Molybdän bei Abwesenheit von Halogenid-Ionen korrosionsstabil. Ab einem Chromgehalt

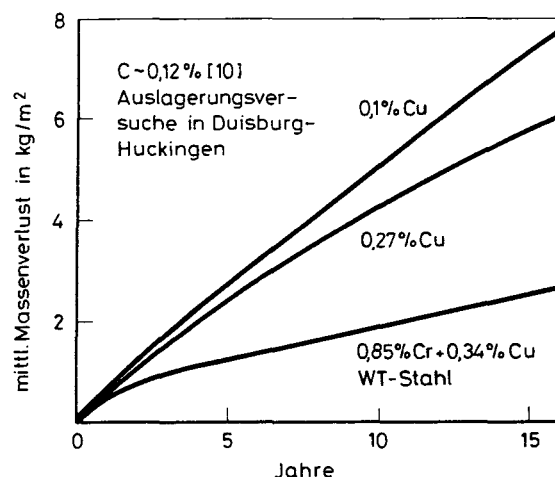


Bild 5.3.11 Massenverlust infolge Korrosion von niedriglegiertem Baustahl an Industrieluft abhängig vom Kupfer- bzw. Chromgehalt und der Zeit

von > 12,5% bilden sie an der Atmosphäre eine dichte, kompakte Schutzschicht aus Chromoxid, die den Stahl passiviert und die sich bei Verletzung sofort nachbildet (s. Abschnitt 5.1).

### 5.3.5.4 Verhalten einiger Nichteisenmetalle

Die geringen Abtragungsraten von Zink, verglichen mit normalem Baustahl, s. Tabelle 5.3.3, sind durch die Bildung einer dichten, festhaftenden Schutzschicht in feuchter Luft bedingt, die im wesentlichen aus Zinkhydroxidcarbonat besteht. Bei der Abtragung von Zink an der Luft wird Zink verbraucht, wobei sich die Schutzschicht ständig nachbildet.

Die Abtragungsrate wird von der Luftverschmutzung beeinflusst. Besonders ungünstig wirkt sich ein erhöhter Schwefeldioxid (Industrieluft) aus: ab pH < 5 (saurer Regen) wird Zink stark aufgelöst. Gleichermäßen korrosionsfördernd sind hochalkalische Bedingungen mit pH > 12,5: Bei Einbettung von Zinkbauteilen oder verzinktem Stahl in Kalk-, Zementmörtel und Beton wird Zink aufgelöst. Ständige Beanspruchung durch Schwitzwasser verhindert die Bildung der Schutzschichten, und es kann dann zu beträchtlichen Anfressungen mit Weißrostbildung kommen [1, 3]. Von großer baupraktischer Bedeutung für das Korrosionsverhalten verzinkter Stahlbauteile ist der passive Schutz von

Stahl durch Zink als Fremdmetallüberzug an Verletzungen oder Fehlstellen der Zinkschicht. Bild 5.3.4 zeigt, als Beispiel für die Wasserstoffkorrosion, daß sich das gegenüber Stahl unedlere Zink bei Verletzung der Zinkschicht opfert. Die Zinkschicht stellt also einen anodischen Schutz des Stahls bei Verletzungen o.ä. dar, deren Ausdehnung aber nur wenige Quadratmillimeter sein darf.

Die gute Korrosionsbeständigkeit von Aluminium beruht ebenfalls auf der Bildung einer passivierenden Schutzschicht, die bei mechanischer Beschädigung ausheilt. Stark basische Baustoffe wie Kalkmörtel greifen Aluminium an. Kupfer ist das edelste Baumetall und ist durch Bildung einer festhaftenden Schutzschicht aus Kupferoxid, -sulfat, -carbonat u.a. (Patina) an der Atmosphäre sehr beständig. Die Bildung der Patina, während der sich der Farbton über rotbraun, grau zu grün wandelt, benötigt mehrere Jahre, wobei saures Regenwasser beschleunigend wirkt. Beim Zusammenbau mit unedleren Baumetallen tritt Kontaktkorrosion auf [1].

Blei ist an der Atmosphäre ein sehr korrosionsstabiles Material. Unter der Einwirkung der Luftkohlenensäure bildet sich eine Schutzschicht aus Bleihydroxidcarbonat, wobei ein Wechsel von Befeuchtung und Abtrocknung notwendig ist. Im stark alkalischen Milieu von Kalk- und Zementmörtel wird Blei angegriffen.

### 5.3.6 Korrosionsschutz im Stahlbau

#### 5.3.6.1 Maßnahmen zur Vermeidung von Korrosionsschäden

Die Maßnahmen, mit denen Korrosionsschäden vermieden werden, können in folgende Gruppen eingeteilt werden:

##### 1. Verhütung von Korrosion durch Werkstoffwahl

Darunter wird die Auswahl jenes Werkstoffs verstanden, der sich unter den vorliegenden Korrosionsbedingungen als korrosionsbeständig erwiesen hat. Beispielsweise sind die nichtrostenden Stähle durch passivierende Schutzschichtbildung gegen atmosphärischen Angriff (ohne  $\text{Cl}^-$ -Ionen) beständig. Die Baustähle nach DIN 17 100 sind keine korrosionspassiven Werkstoffe. Die niedriglegierten, wetterfesten Baustähle sind durch Schutzschichtbildung unter bestimmten Bedingungen als korrosionspassiv einzustufen.

##### 2. Aktiver Korrosionsschutz

Hierunter wird ein ganzes Bündel von möglichen Schutzmaßnahmen verstanden, die bei der konstruktiven Durchbildung beginnen und bis zum Eingriff in den elektrochemischen Korrosionsprozeß reichen.

##### 3. Passiver Korrosionsschutz

Bei Konstruktionen aus unlegierten bis niedriglegierten Baustählen liegen prinzipiell unbeständige Werkstoffe vor. Zum aktiven Schutz muß noch der passive treten, der die Aufgabe der Trennung von Baustoff und Elektrolyt (Angriff) hat. Diese Trennung kann erfolgen durch:

- Überzüge aus Fremdmetall oder anorganischen Stoffen,
- Beschichtungen aus organischen Stoffen.

#### 5.3.6.2 Aktiver Korrosionsschutz

Die möglichen aktiven Schutzmaßnahmen fallen in drei Bereiche:

- Konstruktiver, aktiver Schutz,
- Chemischer Eingriff in den Korrosionsprozeß,
- Kathodischer Schutz.

Im Bauwesen hat die erste Maßnahme die größte Bedeutung, wie die folgenden Erläuterungen zeigen werden.

##### Konstruktiver aktiver Schutz

Er umfaßt neben der zweckmäßigen Auswahl der Werkstoffe und Verbindungsmittel sowohl die konstruktive, korrosionsschutzgerechte Durchbildung der Bauteile und ihrer Verbindungen als auch den Bereich der Arbeiten für die Herstellung und Wartung des passiven Schutzes. In Bild 5.3.12 ist das Strukturdiagramm des aktiven Schutzes nach [7] dargestellt.

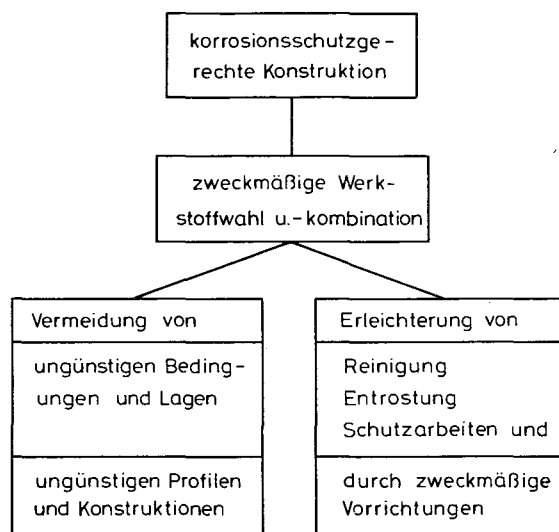


Bild 5.3.12 Konstruktiver aktiver Korrosionsschutz [7] im Stahlbau

Beim korrosionsschutzgerechten Konstruieren [N 2, 7], das »am Reißbrett« beginnt (van Oeteren) ist die Oberfläche des Bauteils, denn an dieser setzt der Angriff an, so klein und so wasserabweisend wie möglich zu formen.

Folgende Forderungen, in Stichworten, sind zu beachten, die durch einige Beispiele unterlegt sind, siehe Bilder 5.3.13 sowie 5.3.14, und in [N 2] eingehend erläutert werden:

##### a) Profilwahl

Die Profile sollen eine möglichst kleine Oberfläche besitzen; einteilige Profile sind mehrteiligen vorzuziehen. Geschweißte Verbindungen sind korrosionsschutztechnisch besser als geschraubte (Spaltkorrosion), aber nur bei durchgehender Naht.

##### b) Vermeidung von ungünstigen Beanspruchungen

Ablagerungen von Schmutz, Bildung von Kondenswasser sind zu vermeiden, die rasche Abführung von Wasser ohne Sackbildung ist anzustreben. Durch nichtleitende Zwischenschichten sind Metalle großer Potentialdifferenz voneinander abzuschirmen (Kontaktkorrosion: Kleine, edle Kathoden sind für eine große, unedle Anode weniger gefährlich als umgekehrt).

### c) Zugänglichkeit der Konstruktion

Für die Ausführung der Schutzarbeit (Beschichtung) am montierten Bauteil, für die Kontrolle und Instandsetzung des Schutzes muß das Bauteil zugänglich sein. Hierunter versteht man im wesentlichen die gegenseitigen Abstände von Profilen [9].

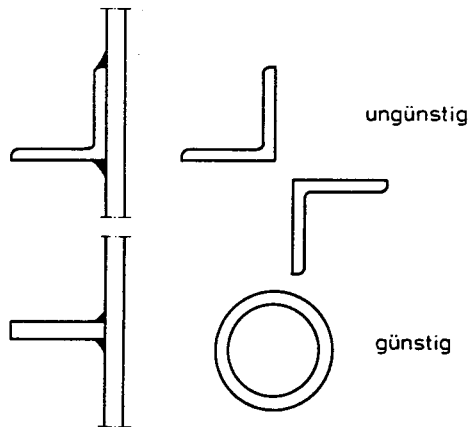


Bild 5.3.13 Profilwahl für aktiven Korrosionsschutz (Beispiele)

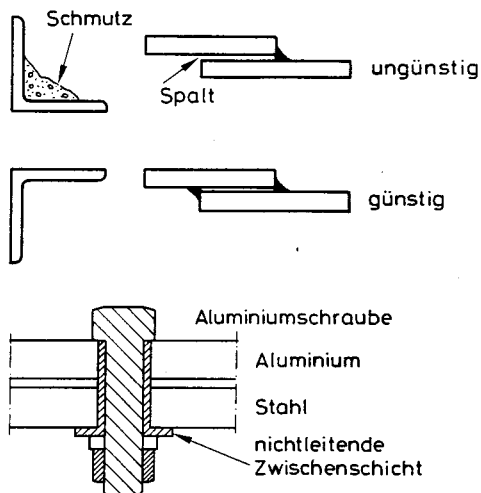


Bild 5.3.14 Vermeidung von Ablagerungen, Spalt- und Kontaktkorrosion

### Kathodischer Schutz

Beim kathodischen Schutz wird in den elektrochemischen Korrosionsprozeß eingegriffen, indem das zu schützende Stahlbauteil zur Kathode gewandelt wird, an der dann eine Metallauflösung nicht stattfindet [1]. Voraussetzung ist, daß sich das Bauteil in einem Elektrolyten befindet wie Meerwasser, feuchter Boden u.a. Man unterscheidet zwei Wege:

- Eine Anode aus einem unedleren Metall wie z.B. Zink oder Magnesium wird mit dem edleren Stahl leitend verbunden. Die Anode wird aufgelöst, opfert sich im Laufe der Zeit. Diese Schutzart wird z.B. für Schiffe, unterirdische Stahltanks u.a. angewandt.
- Durch eine externe Gleichstromquelle wird an einer unlöslichen Anode ein dem Korrosionsstrom entgegengesetzter gerichteter Gleichstrom eingeleitet (Fremdstrom). Dadurch wird das schützende Stahlbauteil z.B.

eine eingeerdete Rohrbohrung zur Kathode, und eine Korrosion ist vereitelt.

### Chemischer Eingriff in den Korrosionsprozeß

Die Aggressivität eines Elektrolyten kann durch Zugabe von korrosionsverhindernden oder -hemmenden Stoffen verändert werden. Derartige Stoffe nennt man Inhibitoren (Hemmstoffe). Die Anwendung von Inhibitoren ist u.a. für Wasserversorgungs- und Heizanlagen sinnvoll (Neutralisierung von Leitungswasser mit angreifender Kohlensäure).

### 5.3.6.3 Arten des passiven Korrosionsschutzes

Nach der Stoffart der Schutzschichten unterscheidet man zwischen

- nichtmetallischen, anorganischen Überzügen,
- Metallüberzügen und
- organischen Beschichtungen.

Die nichtmetallischen, anorganischen Überzüge sind die Glasuren und Emaillierungen (aufgeschmolzene Silikate). Sie werden im Bauwesen kaum eingesetzt.

Ein Metallüberzug kann ebenso wie die Beschichtung aus einer oder mehreren zusammenhängenden Schichten bestehen. Durch Wahl der Stoffe einer Beschichtung, deren Dicke, Applikationstechnik usw. entsteht ein an die Beanspruchung angepaßtes Korrosionsschutzsystem. Überzüge und Beschichtungen können auch zu einem gemeinsamen System kombiniert werden.

Ein wirtschaftlicher Korrosionsschutz erfordert sorgfältige Planung. Diese beginnt mit der korrosionsschutzgerechten Durchbildung der Bauteile und setzt sich mit der Wahl der Maßnahme fort. Die Korrosionsmaßnahme hängt von den Planungsparametern ab, z.B.: Beanspruchung, Nutzungsdauer, Konstruktionsart u.a. Hierauf aufbauend werden Schutzsystem, Oberflächenvorbereitung und Applikationsverfahren festgelegt [N 2, Teil 3; 7 und 8].

### 5.3.6.4 Metallische Überzüge

Durch den metallischen Überzug auf dem Grundwerkstoff entsteht ein Verbundwerkstoff. Das Korrosionsverhalten wird von der Stellung der Partner in der Spannungsreihe bestimmt. Ist der Überzug unedler als das Grundmetall, so wird er angegriffen und umgekehrt. Man kennt folgende Verfahren:

- Schmelztauchen
- Galvanisieren
- Thermisches Spritzen
- Diffusionsverfahren

#### a) Schmelztauchen

Hierbei wird das Stahlbauteil oder Teile von diesem in ein Bad niedrigschmelzender Metalle wie Zink, Zinn und Aluminium (Feuerverzinken, Feueraluminieren) eingetaucht. Dabei bildet sich auf der Stahloberfläche eine fest haftende Schicht, die mit dem Grundwerkstoff eine metallische Verbindung eingeht. Bei der hauptsächlich angewandten Feuerverzinkung (Zn-Bad mit 460 °C) wird die erforderliche Zinkschichtdicke durch die Tauchzeit abhängig von der Stahlzusammensetzung eingestellt (s. Fachzeitschrift Feuerverzinken 1981 u. ff.). Wird die Feuerverzinkung zusam-

men mit einer Beschichtung verwendet, spricht man von einem Duplex-System. Die Kombination hat sich als sehr wirkungsvoll herausgestellt, da die Gesamtschutzdauer länger als die der Summe der Schutzdauer des Metallüberzugs und der Beschichtung ist (Unterrostung tritt nicht ein, Abtrag der Verzinkung wird verhindert).

#### b) Galvanisieren

Hierbei wird der Überzug im Elektrolysebad hergestellt, das eine Salzlösung des zu beschichtenden Metalls (Zn, Cu, Ni, Cd, Sn) ist. Das Grundmetall ist die Kathode, und das beschichtende Metall ist die Anode. Die Anode wird aufgelöst, am Grundmetall erfolgt der Überzug. Auf diese Weise ist das Verzinnen, Vernickeln, Verkupfern von Stahl möglich. Die erzielbaren Schichtdicken sind gering. Mehrschichtkombinationen sind möglich. Anwendung für Installationsgegenstände.

Die Elektrolyse wird auch zur Verstärkung der schützenden Deckschicht von Aluminium verwendet. Dabei wird das Aluminium elektrolytisch (Anode) oxidiert, man bezeichnet dieses Verfahren als Eloxieren. Die Deckschicht ist einfärbbar.

#### c) Thermisches Spritzen

Geschmolzenes Aluminium oder Zink werden aufgespritzt. Dieses Verfahren eignet sich für kleine Flächen, Montage oder Reparaturen.

#### d) Diffusionsverfahren

Bei Einbettung von Stahlteilen in ein Metallpulver z. B. Zink, Chrom und bei hohen Temperaturen entsteht durch Diffusion ein fest haftender, legierungsartiger Überzug auf dem Stahl.

### 5.3.6.5 Beschichtungen

#### *Voraussetzungen, Begriffe*

Beschichtungen dienen dem vorübergehenden und/oder dem dauernden Korrosionsschutz. Die Haltbarkeit beruht auf folgenden Voraussetzungen:

- Vorbereitung der Oberflächen mit einem dem Schutzsystem und der Beanspruchung angemessenen Reinheitsgrad,
- Auswahl geeigneter Stoffe zum Korrosionsschutzsystem,
- Wahl der sachgerechten Applikationstechnik, die die fachgerechte Ausführung gestattet.

Die Beschichtung kann aus einer oder mehreren Schichten aus organischen Stoffen bestehen. Der Begriff Anstrich kennzeichnet nur eine, wenn auch eine sehr häufige Verarbeitungstechnik.

Die Beschichtungen für den vorübergehenden Schutz müssen die Stahlbauteile so lange schützen, bis die endgültige Beschichtung aufgebracht wird. Die Beschichtungen für den Dauerschutz bestehen aus Grundbeschichtungen GB und Deckbeschichtungen DB. Kanten von Bauteilen erhalten einen besonderen Kantenschutz. Dickschichtige Beschichtungen werden einschichtig aufgebracht.

#### *Vorbereitung der Oberfläche, Rostgrad und Reinheit*

Die Wirksamkeit und Schutzdauer einer Beschichtung hängen von der Vorbereitung der zu beschichtenden Oberfläche

(Untergrund) ab. Durch die Oberflächenvorbereitung soll eine bestimmte Reinheit und Rauheit erreicht und die gute Haftung der Beschichtung ermöglicht werden.

Die Wahl des Verfahrens zur Oberflächenvorbereitung hängt vom Ausgangszustand der Oberfläche ab, der bei unbeschichteten Oberflächen durch den Rostgrad und bei beschichteten Oberflächen zusätzlich durch den Blasengrad beschrieben wird (s. [N 2, Teil 4]).

Vor dem Aufbringen der Beschichtung muß die Oberfläche eine bestimmte Reinheit aufweisen, die vom gewählten Schutzsystem, von den Korrosionsbeanspruchungen, vom Ausgangszustand und von dem gewählten Verfahren zur Vorbereitung abhängt. Hierzu ist die Entfernung artfremder Verunreinigungen/Schichten (Schmutz, Ruß, Betonreste, Beschichtungsreste u.a.) und von arteigenen Schichten (Zunder und Rost) notwendig. Folgende Verfahren werden zur Entrostung angewandt:

#### a) Mechanische Entrostungsverfahren

- Handentrostung
- Maschinelle Entrostung
- Strahlen

Die erzielbare Reinheit ist beim Strahlen am größten. Beim Strahlen wird ein Strahlmittel (Quarzsand, Kupferschlacke u.a.) mit Druckluft, seltener mit Druckwasser, gegen das Teil geschleudert.

#### b) Thermische Entrostung, Flammstrahlen

Durch eine Sauerstoff-Acetylen-Flamme ist die Entrostung und Entfernung aller Beschichtungen möglich.

#### c) Chemische Entrostung, Beizen

Entfernung von Rost und allem Anstrich durch Eintauchen in Beizbar (verdünnte Mineralsäure). Sorgfältiges Spülen ist erforderlich. Rostumwandler dürfen nicht verwendet werden.

Die beschriebenen Verfahren u. a. sind auch zur Entfernung artfremder Schichten geeignet. Die Metallflächen sind nach dem Säubern, Entrosten und Nachreinigen sehr korrosionsanfällig und müssen alsbald einen vorläufigen Schutz durch z. B. ein Haftgrundmittel (wash primer), eine Fertigungsbeschichtung (shop primer) o. a. erhalten. Der vorläufige Schutz wird im allgemeinen ins Schutzsystem eingeschlossen, also nicht entfernt, sondern ggf. der Grundbeschichtung ganz oder teilweise angerechnet. Andere, mit dem Schutzsystem unverträgliche, temporäre Schichten – wie z. B. Haftfolien, müssen vollständig entfernt werden.

Die erzielte bzw. angestrebte Reinheit der Oberfläche wird durch den Reinheitsgrad beschrieben. Durch den Vergleich mit photographischen Vergleichsmustern ist die Zuordnung zu Normrost- und Normreinheitsgraden möglich [N 2, Teil 4] und [N 4]. Die mechanische Entrostung erzeugt eine zusätzliche Rauheit der Oberfläche, die die Haftung der Beschichtung auf der Oberfläche verbessert.

Welches Entrostungsverfahren für einen bestimmten Reinheitsgrad unabhängig vom Ausgangszustand notwendig ist, zeigt Tabelle 5.3.4. Diese Tabelle erläutert auch den angestrebten Oberflächenzustand und zieht Vergleiche mit den Entrostungsgraden von [N 5], nach der Schutzarbeiten auszuführen sind.

Tab. 5.3.4 Reinheits- und Entrostungsgrade

Verfahren	Arbeit und Zustand	Norm-Reinheitsgrad [N 2]	Vergleich mit DIN 18364 [N 5]
Strahlen	Entfernung von losem Rost, Zunder und loser Beschichtung	Sa 1	kein Vergleich möglich
	w. o., fast vollständige Entfernung	Sa 2	kein Vergleich möglich
	Reste als Tönung von Poren gestattet	Sa 2½	Entrostungsgrad 2 (metallisch wolkig)
	vollständige Entfernung von Rost, Zunder und Farbe	Sa 3	Entrostungsgrad 3 (metallisch blank)
	feste Beschichtungen bleiben, sonst wie Sa 2½	PSa 2½	Entrostungsgrad 1
Hand- oder maschinelles Entrosten	Entfernung von losem Zunder und Anstrich, Rostentfernung bis schwach metallischer Glanz	St 2	wesentlich geringer als Entrostungsgrad 1
	Entfernung von losem Zunder und Anstrich, Rostentfernung bis deutlicher metallischer Glanz	St 3	geringer als Entrostungsgrad 1
Flammstrahlen	wie Sa 2½	Fl	Entrostungsgrad 2
Beizen	wie Sa 3	Be	Entrostungsgrad 3

#### Beschichtungsstoffe

Ein Beschichtungsstoff besteht aus: Bindemittel, Pigment, Füllstoff und Lösungs-/Verdünnungsmittel. Das Bindemittel hält und verteilt die Pigmente, sorgt für Haftung auf der Oberfläche sowie für eine geschlossene Schicht mit bestimmten Widerstand gegen Abrieb u. a. Pigmente (Farbstoffe) können einen aktiven oder passiven Schutz leisten. Aktive Pigmente, stets in der Grundbeschichtung eingesetzt, schützen den Stahl durch Passivierung. Passive Pigmente wirken nur bei unverletzter Deckbeschichtung. Tab. 5.3.5 enthält die gebräuchlichen Pigmente mit Füllstoffen. Bleimennige, Zinkchromat und Zinkstaub werden bevorzugt

verwendet. Pigmente dienen auch der farblichen Gestaltung.

Die Bindemittel werden nach der stofflichen Zusammensetzung sowie nach dem Trocknungs- bzw. Reaktionsvorgang charakterisiert. In Tabelle 5.3.6 ist eine auszugsweise Zusammenstellung der Bindemittelgruppen und -arten nach [N 2, Teil 5] enthalten (aus [9]). Die angegebene Schichtdicke ist die Einzelschichtdicke der Grundbeschichtung oder Deckbeschichtung, und die erforderliche Trocknungszeit – vor weiterem Schichtauftrag – bezieht sich auf die genannte Schichtdicke. Die Anzahl der erforderlichen Einzelschichten der Grund- und Deckbeschichtung richtet sich nach dem gewählten Korrosionsschutzsystem.

Tab. 5.3.5 Gebräuchliche Pigmente und Füllstoffe

Pigmente für		Füllstoffe für
GB (aktive P.)	DB (passive P.)	DB
Bleimennige <sup>+) </sup>	Aluminiumpulver <sup>+) </sup>	Asbest
Zinkchromat <sup>+) </sup>	Bleiweiß	Bariumsulfat
Zinkphosphat	Eisenglimmer <sup>+) </sup>	Glimmer
Zinkstaub <sup>+) </sup>	Eisenoxid	Graphit
Bleistaub	Titanoxid	Talkum
Basisches Bleisilichromat	Zinkoxid	

<sup>+)</sup>  werden z. Z. bevorzugt angewandt.

#### Korrosionsschutzsystem

Das Korrosionsschutzsystem besteht aus aufeinander abgestimmten Grund- und Deckbeschichtungen bzw. aus einem Metallüberzug mit zusätzlichen Beschichtungen. Das zu wählende Korrosionsschutzsystem richtet sich in erster Linie nach der atmosphärischen Beanspruchung von Tab. 5.3.1 sowie nach ggf. diese übertreffende Sonderbeanspruchungen (chemischer Angriff, Streusalz, Streusand u. a., siehe Tab. 6 von Teil 5, [N 2]). Außerdem ist nach Bauteilen im Freien und nach Bauteilen im Inneren zu unterscheiden, wobei es bei letzteren darauf ankommt, ob die Bauteile zugänglich oder unzugänglich sind. In [N 2], Teil 5 werden Beispiele für Korrosionsschutzsysteme gegeben. Hieraus zeigt Tabelle 5.3.7 auszugsweise für die häufig angewandten Bindemittel Alkydharz, Vinylchloridcopolymerisat und Epoxidharz oder Polyurethan die Schichtzahlen und -dicken abhängig von den Beanspruchungen.

Tab. 5.3.6 Bindemittel für Grund- und Deckbeschichtungen

Bindemittelgruppe	Bindemittel	Korros. Beanspr.	Schichtdicke $\mu\text{m}$	Trockn.-zeit Std.	Eignung für	Binde-mittel-Kennzahl
oxidativ trocknend	Öl	gering bis mittel	40	40	GB/DB	10
	Alkydharz*		40/80	16	GB/DB	11
	Epoxidharzester		40	8	GB/DB	11
	Bitumen-Öl-Kombination		70	16	DB	12
physikalisch trocknend	Chlorkautschuk	erhöht	40	8	GB/DB	20
	Vinylchlorid-*		40	8	GB/DB	20
	Copolymerisat Vinylchlorid- Copolymerisat- Kombination		40	16	GB/DB	21
Reaktions-Bindemittel	Epoxidharz*	extrem	80	16	GB/DB	30
	Polyurethan*		80	16	GB/DB	30
	Kombinationen aus Reaktionsharzen mit Steinkohlenteer		120	16	GB/DB	31

\* bevorzugt angewandt

Tab. 5.3.7 Korrosionsschutzsysteme (Beispiele)

Ort	Korrosionsbeanspruchung			Normreinheitsgrad	Bindemittel	Beschichtungssystem		
						Zahl der GB	Zahl der DB	Schichtdicke $\mu\text{m}$
in geschloss. Räumen	gering	zugängliche Bauteile	r. F. $\leq 70\%$	Sa 2½	Alkydharz, -kombination; Epoxidharzester 6.11	1	—	40
			r. F. $> 70\%$	Sa 2½		1	2	120
	mittel	unzugängliche Bauteile	r. F. $\leq 70\%$	Sa 2½		1	1	80
			r. F. $> 70\%$	Sa 2½		2	2	160
im Freien		Land- und Stadtatmosphäre ohne oder mit durchschn. Immission, keine ständige oder übermäßig lange andauernde erhöhte Luftfeuchte		Sa 2½		2	2	160
	erhöht	Industrie- u. Großstadtatmosphäre ständige u. wiederholte andauernde Luftfeuchte, Kondensatbildung, Meeresatmosphäre		Sa 2½	Chlorkautschuk Vinylchlorid-Copolymerisat 6.20	2 <sup>1</sup>	1 <sup>1</sup>	240
	extrem	Chemische Beanspruchung und besonders aggressive Industrieatmosphäre		Sa 2½	Epoxidharz, Polyurethan 6.30	1 <sup>1</sup>	3 <sup>1</sup>	320

<sup>1</sup> Deckbeschichtungen mit 80  $\mu\text{m}$ , sonst immer 40  $\mu\text{m}$ .

Besonders wirkungsvoll ist das Schutzsystem aus einem Überzug durch Feuerverzinken mit einer Dicke von 50 bis 80  $\mu\text{m}$  und mit ein oder zwei Deckbeschichtungen (siehe Tab. 7 von [N 2], Teil 5). Für die Deckbeschichtung kommen, mit Ausnahme von Öl, Ölkombinationen, alle Bindemittel, allerdings mit unterschiedlichem Widerstand, in Betracht.

Für den Stahlwasserbau, für den Korrosionsschutz unter Brandschutzbeschichtungen u.a. werden besondere Systeme notwendig.

Zur Applikation stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung: Streichen, Rollen, Spritzen, Tauchen u.a. Hierzu wird auf [N 2], Teile 6 und 7 verwiesen.

### Standzeit von Beschichtungen

Über die Standzeit von Beschichtungen lassen sich nur ungefähre Angaben in Abhängigkeit von der Korrosionsbeanspruchung machen. Tabelle 5.3.8 gibt einen Überblick über ungefähre Standzeiten bei normalen atmosphärischen Korrosionsbedingungen [9]. Nach den angegebenen Zeiten ist eine Instandsetzung jedoch keine vollständige Erneuerung der Schutzsysteme erforderlich.

Tab. 5.3.8 Standzeiten von Beschichtungen

Beschichtungen (Anzahl)		Sollschichtdicke (Trockenschichtdicke, gesamt) $\mu\text{m}$	Standzeit*
Grundbeschichtung (GB)	Deckbeschichtung (GB)		
1	–	40	3 Mon.
2	–	80	10 Mon.
2	2	160	12–15 J.
2	2	240–320	15–25 J.
Feuerverzinkung	2	85–160	25–35 J.

\* Innerhalb dieser Zeit müssen die weiteren Beschichtungen aufgebracht bzw. die Deckbeschichtungen erneuert werden.

### 5.3.7 Normen, Richtlinien

- [N 1] DIN 50900: Korrosion der Metalle. Teil 1 Allgemeine Begriffe, Teil 2 Elektrochemische Begriffe, 6/1975.
- [N 2] DIN 55928: Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungen mit Überzügen. 9 Teile unterschiedlichen Ausgabedatums.
- [N 3] Merkblatt für die Beurteilung der Korrosionsgefährdung von Eisen und Stahl im Erdboden. DVGW Regelwerk. Arbeitsblatt GW 9, 1971. ZfGV-Verlag GmbH., Frankfurt/M.
- [N 4] VDI-Richtlinie Nr. 2532. Oberflächenschutz mit organischen Werkstoffen. Gestaltung und Ausführung zu schützender metallischer Konstruktionen, 1/1978.
- [N 5] DIN 18364. VOB Teil C: ATV. Oberflächenschutzarbeiten an Stahl und an Aluminiumlegierungen, 2/1961.
- [N 6] DIN-Taschenbuch 56 (1975): Materialprüfnormen für metallische Werkstoffe. Prüfung von Überzügen, Korrosion und Klima. Zerstörungsfreie Prüfverfahren.
- [N 7] DIN-Taschenbuch 30 (1974): Normen über Anstrichstoffe und ähnliche Beschichtungsstoffe, DIN 55945, 4/1978.

### 5.3.8 Literatur

- [1] Knöfel, D.: Stichwort Baustoffkorrosion. 2. Auflage, Bauverlag GmbH., 1975.

- [2] Knöfel, D.: Metallkorrosion im Bauwesen. Baugewerbe 15 (1978), S. 37/38 und 48/57.
- [3] Krenkler, K.: Chemie des Bauwesens, Bd. 1, Anorganische Chemie, Springer-Verlag, 1980.
- [4] Gellings, P. J.: Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen. Eine Einführung. Carl Hanser Verlag, 1981.
- [5] Kaesche, H.: Die Korrosion der Metalle. Springer-Verlag, 2. Auflage, 1979.
- [6] Rehm, G., Nürnberger, U. und Frey, R.: Zur Korrosion und Rißkorrosion bei Spannstählen. Werkstoffe und Korrosion 32, S. 211/221, 1981.
- [7] Van Oeteren, K.-A.: Korrosionsschutz durch Beschichtungsstoffe. 2 Bde., Carl Hanser Verlag, 1980.
- [8] Van Oeteren, K.-A.: Korrosionsschutz – Beschichtungsschäden auf Stahl. 2 Bde., Bauverlag GmbH., 1979 und 1980.
- [9] Stahlbau Arbeitshilfen Korrosionsschutz Nr. 1, 1.1, 1.2, 1.3 und 1.4. Deutscher Stahlbauverband, Köln, 1982.
- [10] Burgmann, G. und Grimme, D.: Untersuchungen über die atmosphärische Korrosion von unlegierten und niedriglegierten Stählen bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen. Stahl und Eisen 100 (1980), S. 641/650.
- [11] Korrosion und Korrosionsschutz im konstruktiven Ingenieurbau. VDI-Berichte 285, 1977.

## 5.4 Kunststoffe

### 5.4.1 Einleitung

Die Kunststoffe sind eine noch junge Werkstoffgruppe. Ihre Entwicklung begann Mitte des 19. Jahrhunderts mit der chemischen Umwandlung von Naturprodukten wie Zellulose und Rohkautschuk zu Celluloid bzw. Naturgummi. Mit der Herstellung des ersten vollsynthetischen Kunststoffes »Bakelit« um 1907, nach dessen Erfinder Baekeland benannt, setzte eine ständig steigende Kunststoffproduktion ein. Heute haben die Kunststoffe in fast allen Bereichen Eingang gefunden. Im Bauwesen haben sie sich in der Haus- und Sanitärtechnik, als Ausbaustoffe und als Stoffe für den Bautenschutz, die Bauphysik und Bauchemie seit langem bewährt, während ihr Einsatz im konstruktiven Bereich bislang eher begrenzt blieb.

Vorteile der Kunststoffe sind ihre leichte Formbarkeit, ihr geringes Gewicht und ihre niedrige Wärmeleitfähigkeit sowie ihre gute Korrosions- und Chemikalienbeständigkeit. Den Vorteilen stehen auch Nachteile gegenüber wie ein niedriger Elastizitätsmodul, eine ausgeprägte, zeit- und temperaturabhängige Verformbarkeit und Zeitstandfestigkeit. Sowohl durch die chemische Synthese (Modifikation) als auch durch Füllung und Armierung mit anderen, meist anorganischen Stoffen sind die Eigenschaften von Kunststoffen für den jeweiligen Einsatz weitgehend einstellbar. Auf die weiterführende Literatur in Abschnitt 5.4.9 wird verwiesen.

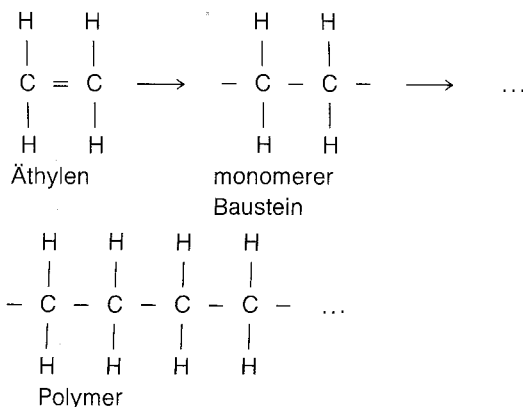
## 5.4.2 Bildungsreaktionen der Kunststoffe

### 5.4.2.1 Ausgangsstoffe

Kunststoffe sind künstlich hergestellte, makromolekulare Werkstoffe organischer Grundsubstanz, die durch Umwandlung von Naturprodukten oder vollsynthetisch aus Monomeren hergestellt werden. Rohstoffbasis für die hier besprochenen vollsynthetischen Kunststoffe sind Erdöl, Erdgas, Kohle u.a.m. Nach der Reaktionsart (Synthese) unterscheidet man drei wesentliche Gruppen: Polymerisation, Polykondensation und Polyaddition.

### 5.4.2.2 Polymerisation

Bei der Polymerisation werden reaktionsfähige Monomere aus Kohlenwasserstoffen ohne Abspaltung von Nebenprodukten zu Makromolekülen verknüpft. Die Monomere enthalten Mehrfachbindungen, deren latente Bindungsenergie durch Zugabe von Initiatoren aktiviert wird, so daß die Bindungen aufgespalten und reaktionsfähig werden. Da keine Nebenprodukte entstehen, besitzt das Polymer die gleiche chemische Zusammensetzung wie der monomere Ausgangsstoff, aber ein Vielfaches des Molekulargewichts. Der Polymerisationsprozeß wird am Beispiel des Polyäthylens gezeigt. Ausgangsstoff ist das Äthylen  $C_2H_4$ , dessen C-Atome durch Aufspalten der Doppelbindung freie Valenzen erhalten. Durch Absättigen der freien C-Valenzen verbinden sich die monomeren Bausteine zu linearen Molekülketten.



Das so entstandene Polyäthylen besitzt ein Molekulargewicht von rd. 25000, während das Monomer Äthylen ein Molekulargewicht von nur 28 aufweist.

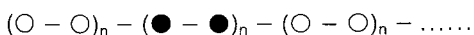
Die Polymerisation gleicher Grundbausteine wird als Isopolymerisation bezeichnet, z.B. Polyäthylen (PE), Polystyrol (PS) und Polyvinylchlorid (PVC). Verwendet man zwei oder mehr verschiedene Monomere, so liegt eine Mischpolymerisation vor. Je nach der Anordnung der Monomere innerhalb einer Molekülkette unterscheidet man dabei zwischen einer statistischen (unregelmäßigen) Verteilung, z.B.



einer alternierenden Reihenfolge, z.B.



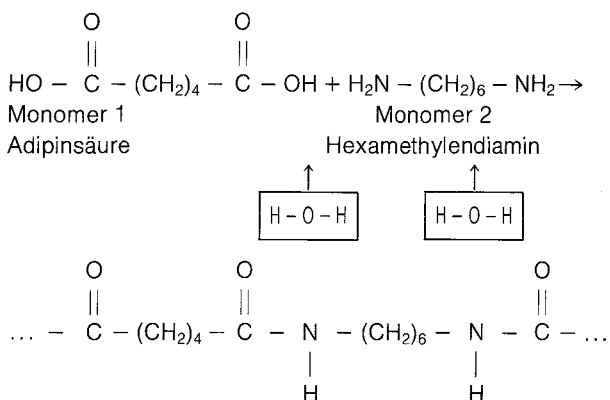
und einer Blockpolymerisation, bei der sich Blöcke aus n-fachen Grundbausteinen abwechseln, z.B.



### 5.4.2.3 Polykondensation

Bei der Polykondensation werden gleich- oder verschiedenartige Monomere unter Abspaltung eines niedermolekularen Stoffes ( $H_2O$ ,  $HCl$ , Alkohol) miteinander verknüpft. Bei Verwendung von bifunktionellen Ausgangsprodukten, d.h. Molekülen mit zwei Verknüpfungsstellen, entstehen lineare Polymere, bei polyfunktionellen Monomeren bilden sich vernetzte Endprodukte.

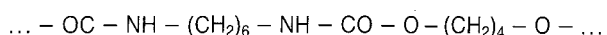
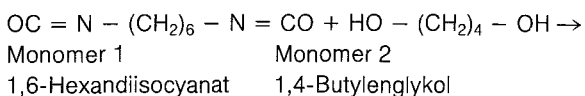
Die Polykondensation ist ein Gleichgewichtsprozeß, d.h. wenn während der Reaktion eine gewisse Menge an Nebenprodukten abgeschieden ist, stellt sich ein chemisches Gleichgewicht ein, und die Reaktion bricht von selbst ab. Sie kann durch Änderung der Kondensationsbedingungen – Temperatur, Druck – wieder in Gang gebracht werden. Diese Eigenschaft wird in der Praxis ausgenutzt, indem man die i. a. flüssigen Zwischenstufen der Polykondensate verarbeitet und erst danach durch geeignete Maßnahmen zum Endprodukt verfestigt. Als Beispiel für eine Polykondensation soll hier die Bildung eines Polyamids (Nylon-Typ) aus Hexamethyldiamin und Adipinsäure gezeigt werden.



Nach dem Verfahren der Polykondensation werden auch Aminoplaste, Phenoplaste sowie Vorprodukte der Epoxid- und ungesättigten Polyesterharze hergestellt.

### 5.4.2.4 Polyaddition

Unter Polyaddition versteht man die Verknüpfung verschiedener Monomere zu Makromolekülen ohne Abspaltung von Nebenprodukten. Bei der Reaktion wandern jedoch einzelne bewegliche Atome, vorzugsweise Wasserstoffatome, an andere Plätze in den Molekülketten; die dadurch freierwerdenden Valenzen werden durch Verkettung der Monomere abgesättigt. Der Ablauf der Polyaddition soll am Beispiel des Polyurethans (PUR) gezeigt werden.



Bei dieser Reaktion brechen die H-Atome der OH-Gruppe des zweiten Monomers die Doppelbindungen  $\text{N} = \text{CO}$  des ersten Monomers auf und lagern sich an die Stickstoffatome an.



#### 5.4.2.5 Mischformen

Heute gibt es eine große Anzahl von Monomeren für die Polyreaktionen, wobei ständig neue Produktions- und Reaktionsmöglichkeiten hinzukommen. Bei dieser Vielfalt fällt es häufig schwer, die einzelnen Polymere einem Bildungstyp eindeutig zuzuordnen. So können z.B. einige Polyamide entweder durch Polymerisation oder durch Polykondensation hergestellt werden; Epoxidharze werden durch eine nacheinander ablaufende Polykondensation und Polyaddition gewonnen.

#### 5.4.2.6 Silikone

Silikone zählen zu den polymeren Substanzen. Zum Unterschied gegenüber den organischen Polymeren werden die Makromoleküle im wesentlichen durch Silizium-Sauerstoff-Ketten gebildet, an die organische Kohlenwasserstoffgruppen angelagert werden. Die verschiedenen Silikon-Typen (Silikonharz, Silikonkautschuk, Silikonöl) sind wasserabweisend, wärmebeständig und besitzen eine gute Korrosionsbeständigkeit (Einsatz beim Bautenschutz).

Tab. 5.4.1 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Baukunststoffe, deren Bildungsreaktion und Anwendungsgebiete. Die Kurzzeichen sind nach [N 1] und [N 2] genormt.

### 5.4.3 Struktur der Kunststoffe

Kunststoffe bestehen aus linearen, verzweigten oder räumlich vernetzten Makromolekülen. Lineare, fadenförmige Molekülketten entstehen aus bifunktionellen Monomeren, bei denen jeweils zwei freie Valenzen für die Bindung an Nachbarmonomere zur Verfügung stehen. Verzweigte Makromoleküle bilden sich, wenn einige Monomere trifunktionell reagieren. Die Einzelmonomere einer Molekülkette werden durch Hauptvalenzkräfte (chemische Bindungen) untereinander verknüpft, während der innere Zusammenhalt der Ketten und ihre Lage zueinander durch elektrostatische Oberflächenkräfte (van der Waals-Kräfte) und durch Dipol-Anziehungskräfte bewirkt wird. Die Ketten sind unregelmäßig, ineinander verknäuelte angeordnet. Die Kunststoffe besitzen eine amorphe Struktur.

Bei einigen Polymeren verlaufen die Ketten abschnittsweise parallel. Diese gerichtete Anordnung der Ketten kann auch durch plastisches Verformen unter Zugspannung (Recken) künstlich herbeigeführt werden. Aufgrund dieses regelmäßigen Aufbaus ergibt sich bereichsweise eine teilkristalline Struktur. Da die Makromoleküle nicht in ihrer ganzen Länge in ein Kristallgitter eingebaut werden können, bilden sich nur kleine Kristalle, sog. Kristallite, die in die amorphe Substanz eingebettet sind. Wegen ihres mechanisch-thermischen Verhaltens werden Kunststoffe mit linearen oder verzweigten Makromolekülen – amorpher oder teilkristalliner Struktur – als Thermoplaste bezeichnet.

Makromoleküle aus monomeren Bausteinen mit drei oder mehr freien Valenzen bilden nicht nur lineare Ketten, sondern auch Querverbindungen zwischen den Ketten aus, so daß ein räumlich vernetztes Maschenwerk entsteht. Der Zusammenhalt dieser Netze wird durch Hauptvalenzkräfte

bewirkt, die bis zur Zersetzungstemperatur wirksam bleiben. Je nach der Maschenweite wird nach stark oder schwach vernetzter Struktur unterschieden. Aufgrund ihres mechanisch-thermischen Verhaltens bezeichnet man schwach vernetzte Kunststoffe als Elastomere und stark vernetzte als Duromere. In Bild 5.4.1 ist der strukturelle Aufbau dargestellt. Die Gruppierung der Kunststoffe nach ihrem mechanisch-thermischen Verhalten erfolgt nach [N 9].

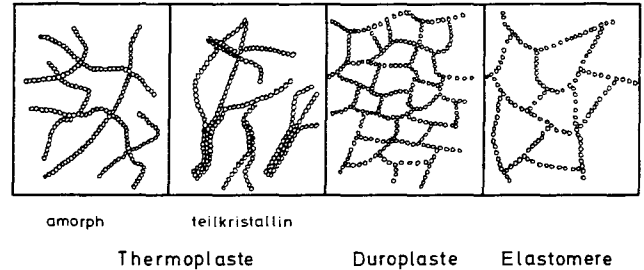


Bild 5.4.1 Struktureller Aufbau der Kunststoffe (schematisch)

### 5.4.4 Aggregatzustände der Kunststoffe

Aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Bindekräfte sind die Kettenmoleküle der Kunststoffe in der Lage, sich zu bewegen. Ihre Bewegungsmöglichkeit richtet sich nach der Molekularstruktur und der Höhe der Temperatur (Wärmeschwingungen). Im folgenden wird das unterschiedliche Temperaturverhalten der einzelnen Kunststoffgruppen beschrieben. Dabei wird der Aggregatzustand durch den Einfluß der Temperatur auf die Zugfestigkeit  $\beta_z$  und die Bruchdehnung  $\delta$  gekennzeichnet (s. Bilder 5.4.2 bis 5.4.5).

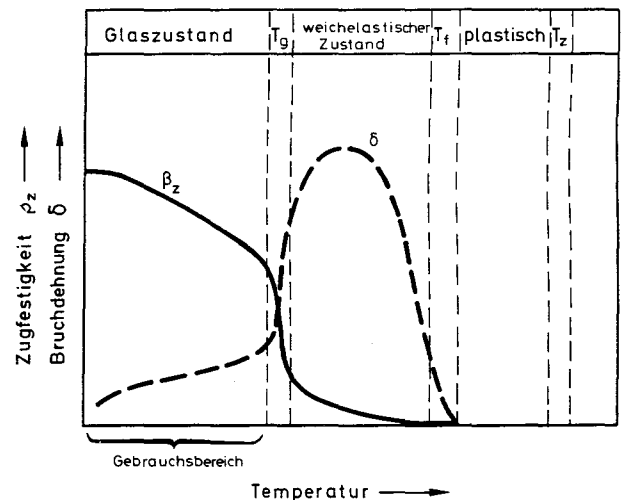


Bild 5.4.2 Schematische Darstellung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens amorpher Thermoplaste

#### 5.4.4.1 Amorphe Thermoplaste

Amorphe Thermoplaste befinden sich bei Normaltemperatur im sogenannten Glaszustand; sie sind hart und spröde. Mit zunehmender Temperatur werden die Bindekräfte zwischen den Ketten kleiner, bis mit Erreichen der Glasüber-

gangstemperatur  $T_g$ , auch Einfrier- oder Erweichungstemperatur genannt, der Kunststoff seinen Zustand ändert und erweicht. Der Erweichungszustand ist durch einen deutlichen Abfall der mechanischen Festigkeitseigenschaften gekennzeichnet.

Bei weiterer Temperatursteigung beginnt der amorphe Kunststoff aufgrund der zunehmenden Eigenbewegung der

Molekülketten (Ableiten) zu fließen. Nach Überschreiten der Fließtemperatur  $T_f$  geht der Kunststoff in eine zähflüssige Schmelze über und wird schließlich bei der Zersetzungstemperatur  $T_z$  zersetzt. Alle bis zur Zersetzungstemperatur durchlaufenen Aggregatzustände sind durch Abkühlen umkehrbar (reversibel), eine Eigenschaft, die bei der Verarbeitung ausgenutzt wird.

Tab. 5.4.1 Übersicht über die wichtigsten Baukunststoffe und ihre Anwendungsgebiete

		Kunststoff	Kurzbezeichnung	Einige Anwendungsgebiete
Thermoplaste	Herstellung durch Polymerisation	Polyäthylen weich hart	PE	Wetterschutzfolien, Dichtungsfolien Trinkwasserrohre
		Polypropylen	PP	relat. temperaturstandfeste Formteile
		Polyisobutylene	PIB	Folien, Dichtungsbahnen
		Polyvinylchlorid hart weich	PVC	Rohre, Profile, Bodenbeläge, Folien, Schaumstoff
		Polymethylmethacrylat	PMMA	Lichtwände, -decken, -kuppeln, Fassadenteile, in dispergiertem Zustand Anstrich und Imprägnierung, im gelösten Zustand Kleber
		Polyvinylacetat	PVAC	Dispersionen, Bindemittel für Spachtelmassen, Anstrichmittel, Klebstoff
		Polystyrol	PS	Schaumstoff
		Polytetrafluoräthylen	PTFE	Gleitlager, Dichtungsmaterial
	Polyad. + Polykond.	Polyamide	PA	Formstücke für Armaturen, Beschläge, Fasern
Elastomere	Polyaddition	Polyurethan <sup>1</sup>	PUR	Bindemittel für Estrich und Beschichtungsmassen, Klebstoffe, Schaumstoffe
		Alkyl-Polysulfid		Fugenabdichtungen, Beschichtungen, Auskleidungen
	Polymerisation	Polychlorbutadien	CR	Auflager, Fugenabdichtungen, Dichtungsbahnen
Duromere	Polykondensation	Aminoplaste Harnstoff-Formaldehydharze, Melaminharze	UF MF	Bindemittel für Preßmassen und Holzwerkstoffe, Holzleime, Schaumstoffe, Dekorationsplatten
		Phenolharze	PF	Schaumstoffe, Wandbekleidungen
		ungesättigte Polyesterharze <sup>2</sup>	UP	Bindemittel für Kunstharzbeton und Estrich, Kleber, Imprägnierungen, Harz für GFK
		Epoxidharz <sup>3</sup>	EP	wie UP
		Silikone	SI	Silikonharze: Imprägnierungen, Lacke, Anstriche Silikonkautschuk: Dichtungen Silikonöl: Imprägnierungen

<sup>1</sup> auch als Zweikomponenten-Harz (Bindemittel, Lacke)

<sup>2</sup> Zweikomponenten-Harz: Aushärtung durch vernetzende Polymerisation

<sup>3</sup> Zweikomponenten-Harz: Aushärtung durch Polyaddition

#### 5.4.4.2 Teilkristalline Thermoplaste

Teilkristalline Thermoplaste verhalten sich im Glaszustand ähnlich wie amorphe Thermoplaste. Der Temperaturbereich des Glaszustands ist jedoch größer. Aufgrund des starken Zusammenhalts der Kristallite ist der Abfall der Festigkeits-eigenschaften bei Erreichen des Erweichungspunktes nicht so ausgeprägt wie bei den amorphen Thermoplasten. Oberhalb des Erweichungspunktes  $T_g$  ist der Kunststoff durch den Molekülzusammenhalt in den Kristalliten fest und formsteif, durch die Beweglichkeit der amorphen Bereiche zugleich flexibel und zäh. Dieser Zustand ist abhängig vom Molekularaufbau, da lineare Molekülketten eine große Kristallisationsneigung besitzen, ungeordnete Seitengruppen verzweigter Molekülketten die Kristallisation jedoch erschweren.

Bei Erreichen der Kristallisationstemperatur  $T_K$  werden auch die kristallinen Bindungen gelöst, und der Kunststoff geht in den zähflüssigen Zustand und dann in Zersetzung über. Auch hier sind alle Zustände bis zur Zersetzung reversibel.

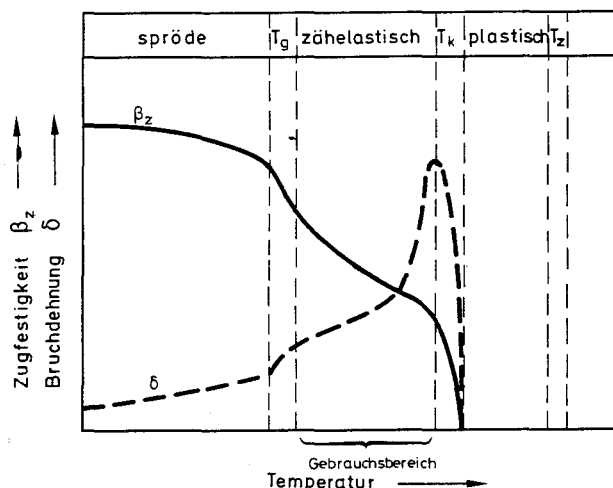


Bild 5.4.3 Schematische Darstellung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens teilkristalliner Thermoplaste

#### 5.4.4.3 Elastomere

Die weitmaschig vernetzten Kunststoffe befinden sich unterhalb des Erweichungsbereichs im Glaszustand, sie sind hart und spröde. Im Erweichungsbereich erfolgt der Übergang zum gummielastischen Zustand, der mit einer starken Abnahme der Festigkeitswerte verbunden ist. Da das Abgleiten der Moleküle durch Querversetzungen behindert wird, nimmt die Dehnbarkeit mit steigender Temperatur zu. Elastomere sind mit geringen Kräften um mehrere 100% dehnbar, beim Aufheben der Spannung kehren die gestreckten Molekülfadenstücke in ihre ursprüngliche Lage zurück. Elastomere zeigen dieses Verhalten unter Gebrauchstemperatur und behalten es bis zum Zersetzungsbereich bei.

#### 5.4.4.4 Duromere

Aufgrund ihrer räumlichen Molekülnetzstruktur verbleiben Duromere bis zur chemischen Zersetzung im festen Zustand. Sie sind ziemlich temperaturstandfest, hart und spröde.

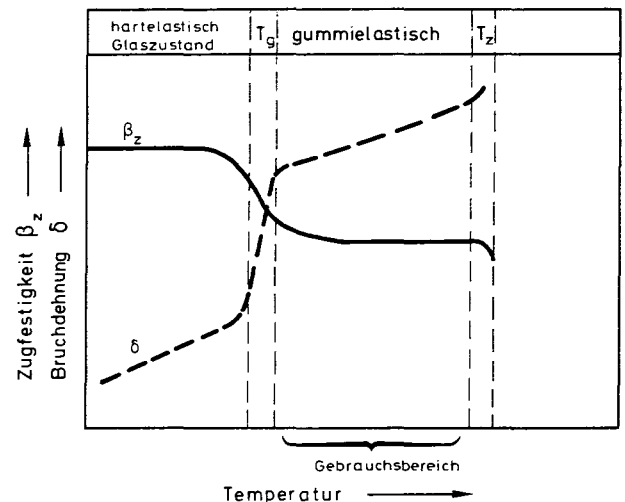


Bild 5.4.4 Schematische Darstellung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens von Elastomeren

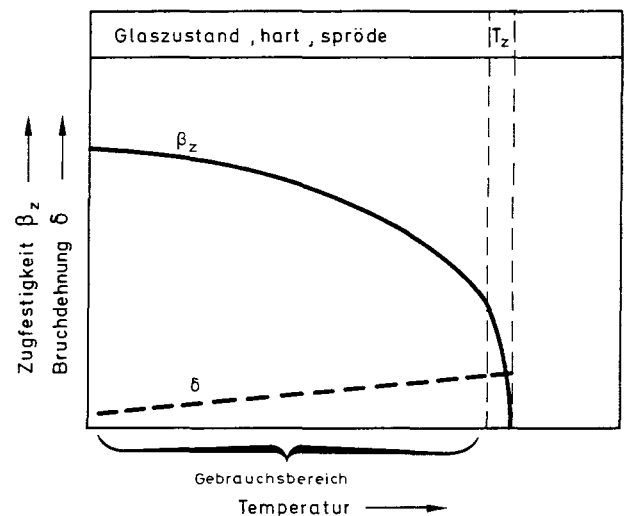


Bild 5.4.5 Schematische Darstellung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens von Duromeren

### 5.4.5 Eigenschaften der Kunststoffe

#### 5.4.5.1 Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe werden von der Molekularstruktur, der Temperatur sowie von der Belastungsart und -dauer beeinflusst. Gezielte Veränderungen der mechanischen Eigenschaften sind bei der Verarbeitung möglich. Dabei werden folgende Maßnahmen angewandt:

- Nacherhärtung durch Wärmezufuhr zur Erhöhung des Vernetzungsgrades.
- Verstreckung von amorphen und teilkristallinen Thermoplasten bei der Formgebung führt zu einer Festigkeitssteigerung und Versteifung.
- Durch Weichmacher, schwer flüchtige Lösungsmittel, kann die Glasübergangstemperatur von Thermoplasten in Richtung höherer Temperaturen verschoben werden. Der Kunststoff kann dadurch gummielastisch-schmiegsam eingestellt werden.

- d) Durch Füllstoffe, die den Vorprodukten beigegeben werden, können die mechanischen, thermischen, elektrischen und chemischen Eigenschaften verändert werden. Füllstoffe sind körnige oder faserige Zusätze anorganischer (z.B. Gesteinsmehl) oder organischer Herkunft (z.B. Holzschliff). Füllstoffe führen zu einer Verfestigung und zum Abbau des Kriechens.
- e) Eine Festigkeitssteigerung ist durch Faserverstärkung zu erzielen (Beispiel GFK).

#### Festigkeit und Verformung im Kurzzeitversuch

Festigkeit und Verformung bei zügiger Belastung werden nach [N 4 bis N 10] geprüft. Wegen der gegenüber anderen Baustoffen viel größeren Abhängigkeit der Kunststoffe von Zeit und Temperatur spielen die Prüfbedingungen eine große Rolle. Die Festigkeits- und Verformungskennwerte müssen deshalb stets im Zusammenhang mit den anzuge-

benden Werten der Prüftemperatur und der Verformungsgeschwindigkeit gesehen werden. Die Übersicht von Tab. 5.4.2 gilt für die Prüfbedingungen von DIN 53455.

Bild 5.4.6 zeigt einige typische Spannungs-Dehnungslinien. Die hartelastischen Duromere besitzen einen deutlichen Hooke'schen Bereich. Die Linie C beschreibt, der Hochpunkt ist die Streckspannung, einen verstrekbaren Thermoplast, während Elastomere ein gummielastisches Verhalten zeigen. Den Einfluß der Prüftemperatur und der Prüfgeschwindigkeit zeigt Bild 5.4.7 schematisch für einen Thermoplast. Tiefe Temperaturen führen zur Versprödung, hohe zur Verweichung. Eine hohe Geschwindigkeit der Beanspruchung oder der Verformung wirkt sich wie eine tiefe Prüftemperatur aus und umgekehrt.

Durch Bild 5.4.8 wird noch einmal der große Einfluß der Temperatur auf die Zugfestigkeit einiger Thermoplaste unterstrichen. Der Elastizitätsmodul folgt einer ähnlichen Abhängigkeit.

Tab. 5.4.2 Eigenschaften einiger Baukunststoffe

Kunststoff-Kurzbezeichnung		Dichte	max. Gebrauchstemperatur <sup>1</sup>	Wärmedehnzahl	Wärmeleitzahl	Anhaltswerte bei Raumtemperatur		
		× 100 in kg/m <sup>3</sup>	°C	10 <sup>-6</sup> /°C	W/mK	Zugfestigkeit	Druckfestigkeit	E-Modul
PE	hart	9,4–9,7	100–120	–	0,419	25,0	30,0	1000
	weich	9,1–9,3	85	200	0,326	11,0	–	200
PP		9,1	130	160	0,157	34,0	–	1400
PIB		9,3	60–120	Folien mit gummielastischem Verhalten				–
PVC	hart	13,9	60	80	0,157	45,0–60,0	80,0	3000
	weich	12,0–13,9	55	200	0,163–0,233	13,0–30,0	–	30
PMMA		12,0	75	80	0,174	74,0	120,0	3000
PVAC		–	–	–	–	–	–	–
PS	hart	10,6	50–70	70	0,203	55,0	100,0	3200
	Schaum	0,15–0,65	70–90	–	0,031	0,2–1,3	0,08–0,05	–
PTFE		22,0	250	70–180	0,233	13,0–27,0	–	400
PA		11,0	80	90	0,302	35,0–75,0	–	2000
UP <sup>2</sup>		12,0	bis 120	140	0,163	40,0–80,0	120–190	4000
EP <sup>2</sup>		13,0	bis 200	75	–	40,0–80,0	90,0–17,0	4000
PUR	hart	12,0	100	160	0,35	20,0–56,0	–	900
	Schaum	0,32–3,0	80–120	–	0,026–0,037	0,2–2,0	1,2–7,0	–
Si		12,5	200	–	–	1,5	(Si-Kautschuk)	
MF		15,0–20,0	100	55	0,465	15,0–55,0		5000–12000
PF, Preßmasse		14,0–20,0	100–150	15–50	0,523	15,0–45,0		4000–15000

<sup>1</sup> ohne mechanische Beanspruchung

<sup>2</sup> unverstärkt

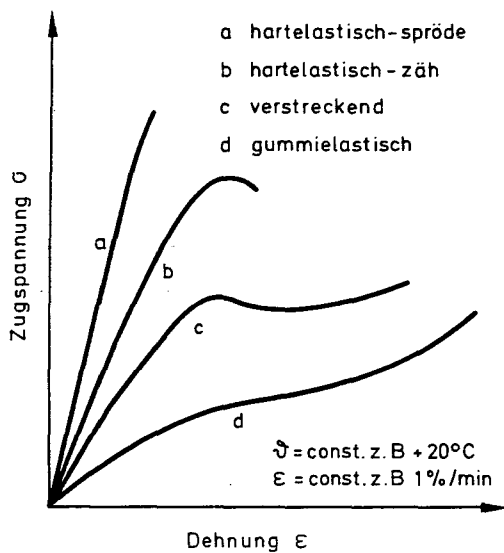


Bild 5.4.6 Typische Spannungs-Dehnungs-Linien von Kunststoffen

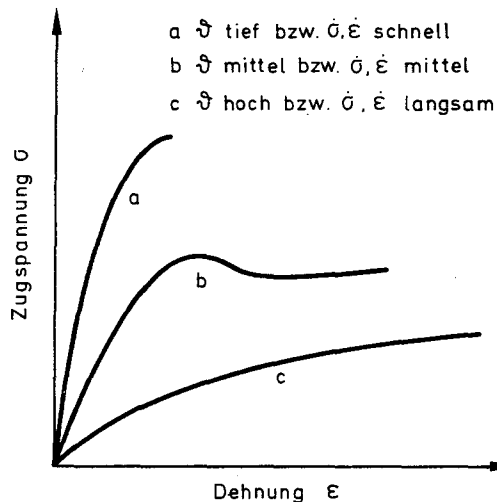


Bild 5.4.7 Einfluß der Temperatur bzw. der Belastungs- oder Verformungsgeschwindigkeit auf die  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie eines Kunststoffs

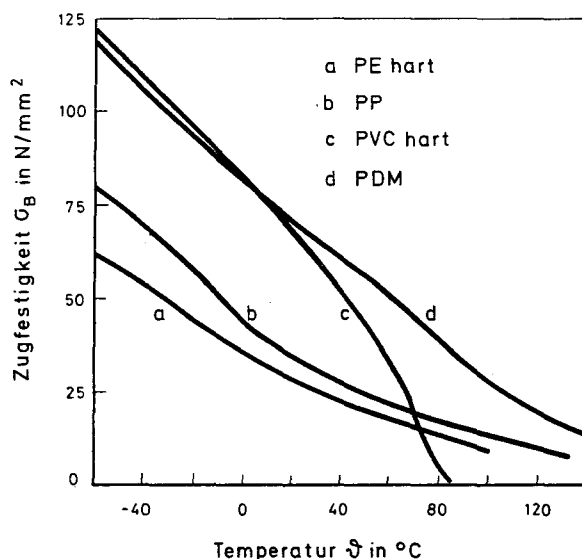


Bild 5.4.8 Kurzzeitfestigkeit einiger Thermoplaste in Abhängigkeit von der Temperatur [15]

## Zeitstandverhalten

Weil Kunststoffe bereits bei mäßigen Beanspruchungen ein zeitabhängiges, viskoelastisches Verformungsverhalten aufweisen, ist für ihren Einsatz das Zeitstandverhalten maßgebend. Das Zeitstandverhalten wird im Kriechversuch geprüft [N 11]. Dabei wird die Kunststoffprobe bei definierter Prüftemperatur einer konstanten Dauerspannung unterworfen; die Dehnung wird zeitabhängig gemessen. Bild 5.4.9 zeigt für Polypropylen die gemessenen Zeitdehnlinien. Die bei den hohen Spannungen 25 und 20 N/mm<sup>2</sup> rasch anwachsenden Dehnungen signalisieren den Kriechbruch. Verbindet man in Bild 5.4.10 die Versagensdauern mit den Bruchspannungen, so erhält man die Zeitbruchlinie. Auf ihr liegen jene Spannungen, die nach einer bestimmten Zeit zum Kriechbruch führen, nämlich die Zeitstandfestigkeiten.

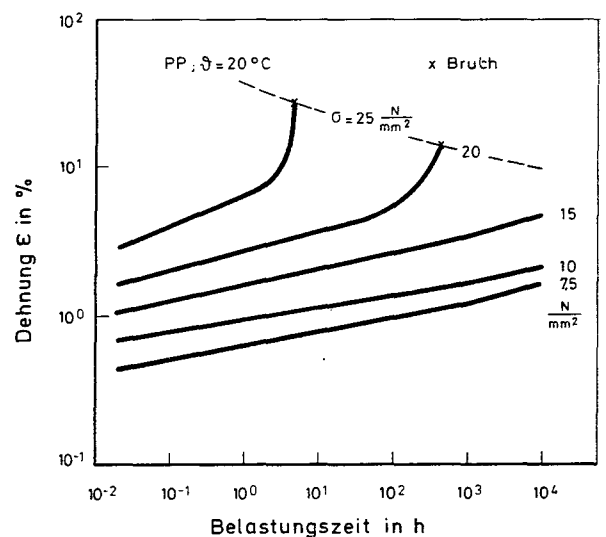


Bild 5.4.9 Zeitdehnlinien von PP [15]

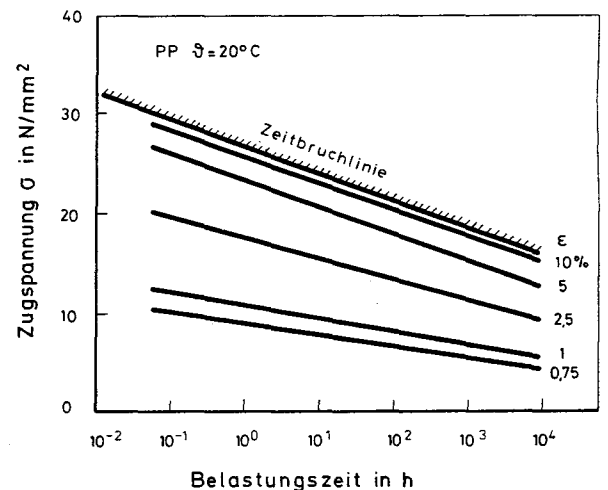


Bild 5.4.10 Zeitstandschaubild von PP [15]

Die Bemessung von Kunststoffbauteilen weist gegenüber der von Bauteilen aus Stahl oder Beton wesentliche Unterschiede auf. Neben der höchsten Gebrauchstemperatur muß auch noch die Betriebsdauer (z. B. 10<sup>5</sup> Stunden = 11 Jahre) festgelegt werden. Die zulässige Gebrauchsspan-

nung muß mit einem Sicherheitsabstand unterhalb der Zeitstandfestigkeit liegen.

Unterhalb der Zeitbruchlinie liegen die Zeitdehnlinsen (s. Bild 5.4.10). Diese Linien vereinigen jene Spannungen und die zugehörigen Belastungsdauern, nach deren Ablauf sich eine bestimmte Dehnung einstellt. Will man also ein Bauteil so dimensionieren, daß eine vorgegebene maximale Dehnung von z.B. 2,5% nach 10000 Std. nicht überschritten wird, so darf die angelegte Spannung nicht höher als 9 N/mm<sup>2</sup> sein.

Erwartungsgemäß übt die Temperatur einen großen Einfluß aus. Mit zunehmender Temperatur werden die Zeitdehn- und die Zeitbruchlinien nach unten verschoben.

Diese experimentell anspruchsvollen Zeitdehnversuche werden in der Regel über Zeiträume von 1000 Std. und weniger durchgeführt. Zeigen die Zeitdehnlinsen, im logarithmischen Zeitmaßstab aufgetragen, einen linearen Verlauf, so kann über ein bis zwei weitere Zehnerpotenzen Zeit extrapoliert werden.

#### *Verhalten bei dynamischer Beanspruchung*

Die Dauerschwingfestigkeit, die für Kunststoffteile im Bauwesen eine untergeordnete Rolle spielt, wird wie bei Baumetallen über Wöhlerversuche bestimmt. Allgemein gültige Aussagen sind nicht möglich, nähere Angaben sind [15] zu entnehmen.

#### 5.4.5.2 Thermische Eigenschaften

Wegen der eingeschränkten thermischen Beweglichkeit der Molekülketten sind Kunststoffe schlechte Wärmeleiter. Die Wärmeleitfähigkeit liegt bei dichten Kunststoffen zwischen 0,1 bis 0,4 W/mK (zum Vergleich Stahl:  $\lambda = 50$  W/mK); Füllstoffe und Verstärkungsfasern erhöhen die Wärmeleitfähigkeit. Besonders niedrige Wärmeleitfähigkeiten besitzen Schaumkunststoffe  $\lambda \sim 0,01$  W/mK (s. Abschn. 4.2.4).

Die Wärmeausdehnungszahlen der Kunststoffe sind im allgemeinen hoch und betragen das 10- bis 20fache von Stahl und Beton. Durch Füllstoffe und Fasern kann die Wärmeausdehnungszahl abgesenkt werden. Die großen Unterschiede im Wärmeausdehnungsverhalten zwischen Kunststoffen und herkömmlichen Baustoffen müssen beim Konstruieren und Zusammenfügen bedacht werden, da sonst Bauschäden infolge Zwang entstehen können (s. Abschn. 4.2.7).

#### 5.4.5.3 Brandverhalten

Kunststoffe sind brennbare Baustoffe; sie werden nach DIN 4102 in die Klassen B 1 (schwer entflammbar) oder B 2 (normal entflammbar) eingestuft. Im Brandfall scheiden Kunststoffe Rauch und ggf. toxische oder korrosionsfördernde Schadstoffe ab. Die Entflammbarkeit kann durch chemischen Einbau anorganischer oder organischer Additive (Brandschutzausrüstung) herabgesetzt werden; die Zusätze können jedoch das Gebrauchsverhalten ungünstig beeinflussen bzw. halogenhaltig sein. Halogenhaltige Kunststoffe spalten im Brandfall Halogenwasserstoffe ab, die sich als Kondensat auf kältere, brandferne Stahl- und Stahlbetonbauteile niederschlagen und Korrosionsschäden verursachen können (s. 4.6).

#### 5.4.5.4 Resistenz

##### *Chemikalienbeständigkeit*

Wegen des stofflichen Aufbaus der Kunststoffe können an ihrer Oberfläche jene Ionenreaktionen, die zur Korrosion metallischer oder mineralischer Stoffe führen, nicht stattfinden. Die chemische Beständigkeit von Kunststoffen ist deshalb im allgemeinen gut, wobei es Unterschiede zwischen den Kunststoffarten abhängig vom aggressiven Medium gibt. Tab. 5.4.3 gibt einen groben Überblick über die chemische Beständigkeit (Näheres s. in [6]).

Die langsame und nachteilige Veränderung von Eigenschaften durch chemischen Angriff wird als chemische Alterung bezeichnet. Hierzu gehört auch die Spannungsrisskorrosion, deren Mechanismus noch nicht ausreichend geklärt ist: an der Oberfläche von Kunststoffbauteilen, die unter fertigungsbedingten oder lastabhängigen Spannungen stehen, können bei gleichzeitiger Einwirkung von bestimmten Stoffen Risse entstehen. Es wird vermutet, daß das Agens in die Oberfläche eindiffundiert und den Kunststoff versprödet. Bei transparenten Kunststoffen (z.B. Lichtkuppeln aus Acrylglas) führt dies zur Eintrübung.

##### *Biologische Resistenz*

Kunststoffe sind im allgemeinen gegen Pilze und Mikroben resistent, sofern sie nicht fetthaltige Weichmacher oder organische Füllstoffe enthalten. Zerstörungen durch Käfer, Termiten und Nager sind beobachtet worden.

##### *Witterungsbeständigkeit*

Trotz ihrer guten Witterungsbeständigkeit erfahren Kunststoffbauteile im Freien unter der komplexen Einwirkung von Feuchtewechseln, Temperatur und Sonnenlicht Veränderungen, die als Alterung bezeichnet werden. Die kurzweilige UV-Strahlung des Sonnenlichts führt zu einem Aufspalten der chemischen Bindungen. Folgen davon sind: Versprödung und Festigkeitsverluste, Verschlechterung der Durchsichtigkeit transparenter Kunststoffe und der Lichtbeständigkeit und anderes mehr. Die Alterungsbeständigkeit muß deshalb durch Beigabe von UV-absorbierenden Lichtstabilisatoren wie Ruß oder Titandioxid gesichert werden.

#### 5.4.6 Lieferformen und Verarbeitung

##### 5.4.6.1 Herstellung und Formung von Kunststoffprodukten

Kunststoffe werden je nach ihrem Anwendungsziel in den verschiedensten Zuständen auf den Baumarkt gebracht, z.B. in fester, flüssiger oder pastöser Form. Thermoplaste werden hauptsächlich als Halbzeuge (Folien, Rohre usw.) und Fertigprodukte (Installationsgegenstände) geliefert. Die Herstellung dieser Produkte erfolgt über Vorprodukte (Formmassen, Pulver, Granulate usw.) nach verschiedenen, warmformgebenden Verfahren, die in [6] und [7] ausführlich beschrieben werden. Flüssige bis pastöse Thermoplaste kommen als Leime, Anstrichstoffe, Zusatzstoffe usw. in der Werkstatt oder auf der Baustelle zum Einsatz. Halbzeuge und Fertigprodukte aus Duromeren werden ebenfalls unter Hitze und Druck geformt und ausgehärtet.

Eine große baupraktische Bedeutung besitzen die Kunstharze als Kleber, Bindemittel für Holzwerkstoffe und Beton, als Baudichtungsstoffe, usw. Die Kunstharze (Polykondensate) werden als Vorkondensate entweder in fester (lösliche oder schmelzbare Harze) oder in flüssiger Form in den Handel gebracht. Die endgültige Aushärtung (Vernetzung) erfolgt im verarbeitenden Betrieb bzw. auf der Baustelle. Die Herstellung von glasfaserverstärktem Kunststoff wird in Abschnitt 5.4.7.6 besprochen.

Die Elastomere kommen als Halbzeuge (Dichtungsprofile), als Fertigprodukte (Elastomerelager) oder als Vorprodukte für den Bautenschutz, die nach Applikation kaltaushärten, zur Anwendung. Die Silikone finden in flüssiger Form (Anstrichstoffe) oder in pastöser Form für Fugendichtungen oder in fester Form als Dichtungsprofile Anwendung.

Die konstruktive Formung von Kunststoffbauteilen erfordert die Beachtung spezifischer Werkstoffeigenschaften wie

Volumenschrumpfung, Kerbempfindlichkeit und anderes mehr, Hinweise enthält [7].

#### 5.4.6.2 Verarbeitung der Kunststoffe

Wegen ihrer thermischen Reversibilität können feste Produkte aus Thermoplasten durch Wärme (zwischen Erweichungs- und Fließtemperatur) umgeformt und miteinander verschweißt werden. Die Schweißverfahren [N 12] werden in [7] beschrieben. Nahezu alle Kunststoffe können bei Anwendung geeigneter Kleber und Klebverfahren geklebt werden [6].

Produkte aus Elastomeren und Duromeren sind endgültig vernetzt. Eine Warmformgebung oder Schweißung ist dann ausgeschlossen, das Fügen durch Klebung ist möglich. Die mechanische Bearbeitung von Kunststoffteilen, z.B. die spanabhebende, ist problemlos.

Tab. 5.4.3 Chemische Beständigkeit von Baukunststoffen

Kunststoffe		Angriffsstoffe																
		Säuren					Laugen		Lösemittel					Treibstoffe und Öle				
		schwach	stark	oxydierend	Flußsäure	Halogene (trocken)	schwach	stark	Alkohole	Ester	Ketone	Äther	Chlorkohl.-W.	Benzol	Benzin	Treibstoffgem.	Mineralöl	Fette, Öle
PE	hart	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	○	⊕	○	⊕	⊕	⊕	+
	weich	+	+	-	+	-	+	+	○	○	○	-	-	-	⊖	-	○	⊖
PP		+	+	-	○	⊖	+	+	+	⊕	⊕	○	⊖	⊖	⊕	○	+	+
PIB		+	+	○	+	○	+	+	+	-	○	-	-	-	-	-	-	
PVC	hart	+	+	⊕	⊕	○	+	+	+	-	-	-	⊖	-	+	⊖	+	+
	weich	+	⊕	○		-	+	○	○	-	-	-	-	-	⊖	-	○	○
PMMA		+	+	○	○	○	+	+	○	-	-	○	-	-	+	-	+	+
PVAC									-	-	-		-	-	⊕		⊕	
PS	hart	+	⊕	○	⊕	-	+	+	+	-	-	-	-	-	○	-	○	+
	Schaum																	
PTFE		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
PA		-	-	-	-	-	+	○	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
UP		+	○	⊖	⊖	⊖	○	⊖	⊕	⊖	-	-	-	⊖	+	+	+	+
EP		+	+	-	⊕	+	⊕	⊕	+	○	⊕	+	○	+	+	+	+	+
PUR	hart	○	-	○	⊖		+	-	⊕	○	⊖	+	○	+	+	○	+	○
	Schaum	+	○	-	-	-	○	○	⊕	-	-	⊕	-	⊖	+	○	+	+
Si		+	-	-	-		+	⊕	⊖	⊖	+	-	-		○	○	○	⊕
MF		○	-				+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
PF, Preßm.		+	-				+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

+ = beständig

○ = bedingt beständig

- = unbeständig

⊕ = bedingt beständig bis beständig

⊖ = bedingt unbeständig bis unbeständig

Die Verarbeitung von Flüssigkunststoffen, insbesondere von Reaktionsharzen, erfordert die gewissenhafte Einhaltung der Vorkehrungen des Arbeitsschutzes und der Verarbeitungsvorschriften.

## 5.4.7 Anwendungsgebiete der Kunststoffe im Bauwesen

### 5.4.7.1 Überblick

Kunststoffe werden heute in nahezu allen Gebieten des Bauwesens angewandt. Umfassende Darstellungen sind in [6], [7] und [16] enthalten. Die Einsatzgebiete lassen sich in stichwortartiger Aufzählung wie folgt ordnen:

- a) Bautenschutz, insbesondere Feuchteschutz und Bauwerksdichtung
- b) Wärme- und Schallschutz
- c) Bindemittel für mineralische und organische Stoffe
- d) Kleber und Leime
- e) Technischer Ausbau
- f) Innenausbau, Möbelbau, Baugestaltung
- g) Hilfsstoffe für die Bauausführung (Schalungen)
- h) Tragende Elemente (GFK-Bauteile, Elastomerelager etc.)

Von diesen Einsatzgebieten können nur einige in gedrängter Form besprochen werden.

### 5.4.7.2 Kunststoffe im Bautenschutz

Gerade im Bautenschutz haben die Kunststoffe eine große Bedeutung wegen ihrer Resistenz und Zähigkeit erlangt. Tab. 5.4.4 gibt einen Überblick über die wesentlichen Kunststoffe, deren Schutzaufgaben und Anwendungsfelder.

### 5.4.7.3 Wärme- und Schalldämmung durch Schaumkunststoffe

Nahezu alle Kunststoffe sind schäumbar. Bereits in Abschnitt 4.2 wurde die Leistungsfähigkeit zur Wärmedämmung von geschlossenzelligen Schaumkunststoffen erläutert. Da die Rohdichte, Porosität und auch die dynamische Steifigkeit der Schäume einstellbar ist, werden Schaumkunststoffe auch zur Schalldämmung verwendet. Die übliche Lieferform sind Halbzeuge wie Platten und Blöcke. Tab. 5.4.5 enthält Richtwerte der Eigenschaften. UF- und PUR-Schaum wird auch als Ortschaum verwendet. Durch Ausschäumen von Trapezblechelementen entsteht ein Verbundbauteil, die sog. Sandwichkonstruktion, in der der

Tab. 5.4.4 Kunststoffe für den Bautenschutz

Aufgabe	Kunststoff		Anwendung
Flüssigkunststoffe für Anstriche, Beschichtungen, Versiegelungen zum Oberflächen-/Korrosionsschutz und zur Gestaltung	Polyvinylacetat	PVAC	Dispersionen für den Oberflächenschutz von mineralischen Untergründen
	Polyvinylpropionat	PVP	
	Polyacrylester		
	Alkydharz		
	Reaktionsharz	EP, UP, PUR	Beschichtungen für beliebige Untergründe
	Silikonharz	SI	
	Alkydharz		
	Silikon	SI	Imprägnierungen und Versiegelungen
	Polyurethan	PUR	
Folien und Bahnen für den Feuchteschutz und für Dichtungen [N 13] bis [N 18]	Polyäthylen	PE	dünne durchsichtige Folien ggf. verstärkt bzw. auf Trägerschichten
	Polyvinylchlorid	PVC	
	Polyisobutylene	PIB	
	Polytetrafluoräthylen	PTFE	
	Polyisobutylene	PIB	Abdichtungsbahnen für Dächer, Erdbau, Wasser- und Deponiebau
	Polyvinylchlorid, weich	PVC	
	Butylkautschuk	IIR	
	Polychloropren	CR	
Kunststoffmassen zur Abdichtung von Fugen [N 19]	Acrylmassen		plastisch, weiche plasto-elastische plasto-elastische elastische elastische, hochdehnfähige Fugenmasse
	Butylkautschuk		
	PIB-Mastix		
	PUR-Masse		
	Polysulfidmasse		
	Silikonkautschukmasse		
Fugenprofile	Weich PVC		gummielastische Dichtungsprofile, -bänder oder Fugenabdeckungen
	Chloropren	CR	
	Butylkautschuk	IIR	



Tab. 5.4.5 Eigenschaften von Hartschaumkunststoffen

Eigenschaften	Einheit	Phenolharz	Harnstoffharz	Polystyrol-		Polyurethan-
		PF	UF	Partikel- schaum PS	Extruder- schaum EPS	formschaum PUR
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	40–100	5–15	15–30	40	20–100
Zugfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	≥ 0,5	–	≥ 0,5	≥ 0,5	0,2–1,1
E-Modul (Biegung)	N/mm <sup>2</sup>	6–27	–	2–20	> 15	2–20
Wärmeleitzahl	W/mK	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03–0,04
langzeitige Gebrauchstemperatur	°C	130	90	75	80	80
Wasserdampf-Diffusions- widerstandszahl $\mu$	–	30–300	4–10	30–70	150–300	30–130

Schaum das Blech aussteift und die Wärmedämmung besorgt. Auch andere Deckschichten, wie z. B. Aluminium oder GFK, werden in Sandwichelementen eingesetzt. Schaumkunststoffe sind in [N 20] bis [N 22] genormt.

#### 5.4.7.4 Kunstharze als Bindemittel für Beton, Mörtel und Putz

Kunstharze werden dann als Bindemittel für Betone, Mörtel und Putze eingesetzt, wenn der spezielle Anwendungsfall die rasche Festigkeitsentwicklung, die hohe Festigkeit, die hohe Beständigkeit und das gute Haftvermögen des Kunstharzes erfordert und damit dessen hohe Kosten gerechtfertigt sind.

Als Bindemittel für Kunstharzbeton haben sich EP- und UP-Harze bewährt. Der Harzgehalt in Gewichtsteilen je m<sup>3</sup> Beton entspricht etwa dem Zementgehalt von Normalbeton. Tab. 5.4.6 zeigt eine Gegenüberstellung der Eigenschaften von Kunstharzbeton bzw. -mörtel und Normalbeton [6]. Die

Anwendung von Kunstharzbeton beschränkte sich bisher auf Sonderaufgaben wie z. B. nachträgliche Querschnittsergänzungen, Verstärkungen, Abwasserrohre u. a. Die höchste Gebrauchstemperatur liegt bei rd. 100 °C.

Die Betonherstellung und -verarbeitung erfordert große Sorgfalt. Die Mischungszusammensetzung, vor allem des Bindemittels, das aus Harz, Härter und Beschleuniger besteht, muß sehr genau sein. Den Verlauf der Kaltaushärtung eines Reaktionsharzes zeigt Bild 5.4.11. Bereits nach 24 Std. ist, abhängig von der Außentemperatur, die Aushärtung weit fortgeschritten. Während der einstellbaren Topfzeit muß der Beton oder Mörtel verarbeitet werden. Die Volumenschumpfung bei Aushärtung übertrifft die von Normalbeton.

Kunstharzputze werden auf Flächen mit hoher Verschleißbeanspruchung (Treppenhäuser), auf Dämmschichten von Thermohäuten und für dekorative Zwecke eingesetzt. Die Bindemittel sind Dispersionen von Flüssigkunststoffen, wie z. B. PVAC und PVP. Übliche Putze können durch Dispersionsharzzusätze weniger rißanfällig und verfestigt werden. Flüssige, niedrigviskose Kunstharze werden häufig in Form von Injektionen zur Bauteilsanierung, Rißdichtung, Baugrunderdichtung usw. angewandt. Neben den am häufigsten verwendeten EP-Harzen werden auch UP-, PMMA- und PUR-Harze eingesetzt.

Tab. 5.4.6 Eigenschaften von Kunstharzbeton bzw. -mörtel im Vergleich zu Normalbeton

Eigenschaft	Einheit	Normal- beton hochwertig	Kunstharz- beton bzw. Klebe- mörtel
Bindemittel- gehalt	M.-%	> 12	8–15
Dichte	kg/dm <sup>3</sup>	~ 2,4	2,0–2,4
Druckfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	30–60	70–150
Biegezugfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	4–7	15–40
Druckelastizitäts- modul	kN/mm <sup>2</sup>	30–40	15–30
Wärmeausdeh- nungszahl	10 <sup>-6</sup> · °C <sup>-1</sup>	10	10–20

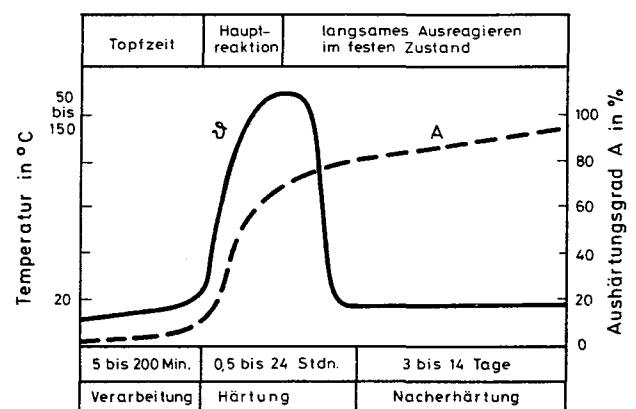


Bild 5.4.11 Verlauf der Kalthärtung von Reaktionsharz

#### 5.4.7.5 Leime und Kleber aus Kunststoffen

Die Holzwerkstoffe Sperrholz, Hartfaserplatte und Holzspanplatte werden durch Kunstharze gebunden bzw. verleimt. Die zur Anwendung kommenden Kunstharze werden in Abhängigkeit von der Höhe der Luftfeuchtigkeit ausgewählt. Die Widerstandsfähigkeit gegen hohe Luftfeuchtigkeit entspricht etwa der Reihenfolge: Harnstoff-, Melamin-, Phenol- oder Resorcinharz. Im Holzleimbau werden Harnstoff-Formaldehydleime für Innenbauteile und Phenol- oder Resorcinharz für hohe Raumfeuchte und Außenbauteile verwendet.

Kunststoffkleber, mit denen Kunststoffe untereinander und Bauteile aus beliebigen Werkstoffen dauerhaft und fest zusammengefügt werden können, wurden entwickelt. Dabei ist nach folgenden Kleberarten zu unterscheiden [N 23]:

##### a) Dispersionskleber

In Wasser fein verteilte thermoplastische Kunststoffe wie PVAC, PIB u. a. dienen zum Kleben auf saugfähigen Untergründen bzw. von porösen Stoffen, damit das Dispersionswasser versickern bzw. verdunsten kann (Baukleber).

##### b) Kontaktkleber

Sie sind Lösungen aus weichen Kunststoffen wie Polyisobutylen oder Polychloropren. Nach Auftrag des Klebers muß das Lösungsmittel verdunsten können, ehe die Klebpartner zusammengefügt werden. Kontaktkleber dienen z. B. zum Verkleben von Bodenbelägen.

##### c) Lösungsmittelkleber

Durch das Lösungsmittel werden die Oberflächen der Klebpartner angelöst, so daß eine feste chemische Verbindung entsteht (kohäsive Bindung).

##### d) Reaktionsharzkleber

Sie erhärten durch chemische Reaktion und verbinden bei hoher eigener Kohäsionsfestigkeit durch Adhäsion. Hochfeste Klebverbindungen werden mit Zweikomponentenklebern aus EP bzw. UP in kurzer Härtingszeit erzielt. Sie können deshalb für tragende Verbindungen von Stahl- und Betonbauteilen eingesetzt werden.

#### 5.4.7.6 Glasfaserverstärkte Kunststoffe GFK

Von zunehmender bautechnischer Bedeutung ist die Verstärkung von Polyesterharzen (GF-UP), weniger von Epoxidharzen (GF-EP), durch die Einbettung von Glasfasern, wodurch ein Verbundwerkstoff entsteht, in dem das Harz die schubfeste Verbindung der Fasern bewirkt. Es wird damit eine Erhöhung der Steifigkeit, der Festigkeit und der Gebrauchstemperatur erzielt und der Einsatz für tragende Konstruktionen ermöglicht. Für die Verstärkung kommen alkaliarme Glasfasern zur Anwendung, die einer Alkalilaugung durch Feuchtigkeit widerstehen. Die Glasfasern (Einzeldicke 5 bis 15  $\mu\text{m}$ ) werden entweder als längsorientierte Stränge (Rovings) oder in flächiger Form als Matten, Vliese, Gewebe etc. geliefert. Die Fertigungsverfahren von Bauteilen aus GFK werden in [10] und [11] ausführlich beschrieben. Man unterscheidet nach folgenden Verfahren:

- Handlaminierverfahren. Auf eine Mutterform (Matrize) werden in Harz getränkte Matten, Gewebe etc. aufgelegt und verdichtet. Nach dem Aushärten wird das GFK-Teil, z. B. ein Fassadenelement, von der Matrize abgehoben.
- Faserspritzverfahren. Auf die Matrize wird ein Gemisch aus Harz und Glasfaserabschnitten aufgespritzt und verdichtet. Anwendung für Formteile, im Stollenbau als Wasserisolierung und anderes mehr.
- Wickelverfahren. Kontinuierliches Aufwickeln getränkter Faserstränge oder Gewebebänder auf einen Kern zur Rohrherstellung.

Daneben gibt es noch weitere Verfahren. Die Verfahren a und b sind handwerkliche; sie können zur Herstellung von Bauteilen, Betonschalungen usw. eingesetzt werden. Durch Stränge findet die Verstärkung in nur einer, eben der Strangrichtung statt. Für Bauteile muß die Verstärkung in der Ebene gleichmäßig erfolgen. Durch Matten mit beliebiger Faserorientierung wird die ideale Isotropie in der Ebene erreicht [7, 14].

In Bild 5.4.12 sind die Spannungsdehnungslinien der Einzelstoffe und des Verbundwerkstoffs dargestellt. Die Glasfaser ist ein Werkstoff hoher Zugfestigkeit (1700–3600 N/mm<sup>2</sup>), der ohne bleibende Verformung spröde reißt. Der E-Modul beträgt etwa ein Viertel des E-Moduls von Stahl. Festigkeit und E-Modul von GFK nehmen mit dem Glasgehalt zu, der für tragende Elemente zwischen 40 und 65 M-% liegt.

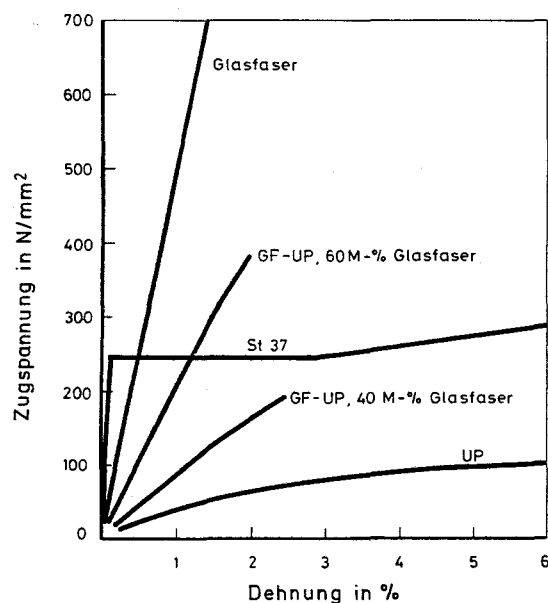


Bild 5.4.12 Spannungs-Dehnungslinien von GF-UP und der Einzelstoffe im Vergleich zu St 37

#### 5.4.8 Normen, Richtlinien

Das Vorschriftenwerk für Kunststoffe und deren Anwendungen ist sehr umfangreich. Die aufgeführten Normen stehen mit den hier besprochenen Problemen und Anwendungen im Zusammenhang.

Darüber hinaus gibt es noch zahlreiche weitere Produkt-, Güte- und Anwendungsnormen sowie Richtlinien und Arbeitsblätter.

- [N 1] DIN 7728: Kunststoffe; Kurzzeichen für Homopolymere, Copolymere und Polymergemische; T. 1; 4.78.
- [N 2] DIN 7728: Kunststoffe; Kurzzeichen für verstärkte Kunststoffe; T. 2; 3.80.
- [N 3] DIN 7724: Gruppierung hochpolymerer Werkstoffe aufgrund der Temperaturabhängigkeit ihres mechanischen Verhaltens; Grundlagen, Gruppierung und Begriffe; 2.72.
- [N 4] DIN 53421: Prüfung von harten Schaumstoffen, Druckversuch; 5.71.
- [N 5] DIN 53435: Prüfung von Kunststoffen; Biegeversuch und Schlagbiegeversuch an Dynstat-Probestkörpern; 4.77.
- [N 6] DIN 53455 E: Prüfung von Kunststoffen; Zugversuch; 01.81.
- [N 7] DIN 53452: Prüfung von Kunststoffen; Biegeversuch; 4.77.
- [N 8] DIN 53453: Prüfung von Kunststoffen; Schlagbiegeversuch; 5.75.
- [N 9] DIN 53454: Prüfung von Kunststoffen; Druckversuch; 4.71.
- [N 10] DIN 53457: Prüfung von Kunststoffen; Bestimmung des Elastizitätsmoduls im Zug-, Druck- und Biegeversuch; 5.68.
- [N 11] DIN 53444: Prüfung von Kunststoffen; Zeitstand-Zugversuch; 4.68.
- [N 12] DIN 16960: Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen; Grundsätze; T. 1; 2.74.
- [N 13] DIN 4122: Abdichtung von Bauwerken gegen nicht-drückendes Oberflächenwasser und Sickerwasser mit bituminösen Stoffen, Metallbändern und Kunststofffolien; Richtlinien; 3.78.
- [N 14] DIN 16730 bis DIN 16734: Normen für Kunststoffdachbahnen; 5. und 12.76, 12.79.
- [N 15] DIN 16935: PIB-Bahnen für Bautenabdichtungen; Anforderungen, Prüfungen; 5.71.
- [N 16] DIN 16937: PVC-weich-Bahnen, bitumenbeständig, für Bautenabdichtungen; Anforderungen, Prüfung; 5.71.
- [N 17] DIN 16938: PVC-weich-Bahnen, nicht bitumenbeständig, für Abdichtungen; Anforderungen, Prüfung; 5.71.
- [N 18] DIN 18190: Dichtungsbahnen für Bauwerksabdichtungen, 5 Teile; 7.75.
- [N 19] DIN 18540: Abdichten von Außenwandfugen im Hochbau mit Fugendichtungsmassen, 3 Teile; 1.80.
- [N 20] DIN 7726: Schaumstoffe; Begriffe, Einteilung; E 5.81.
- [N 21] DIN 18164: Schaumkunststoffe als Dämmstoffe für das Bauwesen, 2 Teile; 6.79.
- [N 22] DIN 18159: Schaumkunststoffe als Ortsschäume im Bauwesen, 2 Teile, 9.81.
- [N 23] DIN 16920: Klebstoffe, Klebstoffverarbeitung, Begriffe; 6.81.

## 5.4.9 Literatur

- [1] Biederbick, K.: Kunststoffe. Vogel-Verlag, Würzburg, 1977.
- [2] Brunsch, K.: Faserverbundwerkstoffe – hohe Festigkeit/kleine Masse. VDI-Berichte Nr. 309, 1978.
- [3] Kunststoff-Taschenbuch. Carl Hanser Verlag, 1974.
- [4] Meysenbug v., C.-M.: Kunststoffkunde für Ingenieure. Carl Hanser Verlag, 1968.
- [5] Puck, A., Wurtinger, H.: Werkstoffgemäße Dimensionierungs-Größen für den Entwurf von Bauteilen aus kunstharzgebundenen Glasfasern, Teil I und II. Westdeutscher Verlag, 1963.
- [6] Saechtling, H.: Baustofflehre Kunststoffe für Bauingenieure und Architekten. Carl Hanser Verlag, 1975.
- [7] Saechtling, H.: Bauen mit Kunststoffen. Carl Hanser Verlag, 1973.
- [8] Schlichting, J., u.a.: Verbundwerkstoffe. Lexika Verlag, 1978.
- [9] Schulz, G.: Die Kunststoffe. Carl Hanser Verlag, 1959.
- [10] Schwarz, O.: Glasfaserverstärkte Kunststoffe. Vogel-Verlag, 1975.
- [11] Selden, P. H.: Glasfaserverstärkte Kunststoffe. Springer Verlag, 1967.
- [12] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile, Band 4: Holz, Kunststoffe. Bauverlag, 1973.
- [13] Zitscher, F. F.: Kunststoffe für den Wasserbau. Bauingenieur-Praxis, Heft 125, Wilhelm Ernst & Sohn, 1971.
- [14] Reinhardt, H. W.: Ingenieurbaustoffe. Wilhelm Ernst & Sohn, 1973.
- [15] Taprogge, R.: Konstruieren mit Kunststoffen. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 2. Auflage, 1974.
- [16] Himmler, K.: Kunststoffe im Bauwesen, Werner-Verlag, Düsseldorf, Werner-Ingenieur-Texte 62, 1981.

## 5.5 Holz und Holzwerkstoffe

### 5.5.1 Einleitung

Holz ist einer der ältesten Baustoffe, der heute wie früher wegen seiner hohen Festigkeit, seines niedrigen Gewichts und v.a. wegen seiner leichten Bearbeitbarkeit Vorzüge aufweist. Nachteilig sind die geringe Beständigkeit von Holz bei Wechsellagerung, das beträchtliche Schwinden und Quellen, Gefügeungleichmäßigkeiten durch Holzfehler und die leichte Zerstörbarkeit durch Brand und Schädlinge. Holz ist ein natürlicher Stoff und wegen seiner Zellstruktur anisotrop. Ungleich zu künstlichen Baustoffen, deren Eigenschaften weitgehend modifizierbar sind, weist Holz – zumindest beim aus dem Stamm hergestellten Vollholz – eben die Merkmale eines natürlich gewachsenen Stoffes auf. Durch Forstwirtschaft und durch Verfahren der Holzsortierung, -verarbeitung und -behandlung konnte eine hohe und gleichmäßige Holzgüte erreicht werden. Durch die Entwick-

wicklung von besonderen Verfahren des Fügens erfährt der Ingenieurholzbau gegenwärtig eine neue Blüte, nachdem Holz durch Beton und Stahl im konstruktiven Ingenieurbau weitgehend verdrängt worden war. Chemischer und konstruktiver Holzschutz sichern die Dauerhaftigkeit. Die Entwicklung von Holzwerkstoffen gewinnt zunehmende Bedeutung. Es gelingt damit, einige der negativen Holzeigenschaften wie z.B. die Anisotropie zu verbessern und außerdem Abfälle der Holzbearbeitung zu nutzen. Holzwerkstoffe, echte Verbundwerkstoffe, werden vornehmlich im Innenausbau, im Möbelbau, aber auch für mäßig belastete Tafeln und Platten im Fertighausbau eingesetzt. Aber auch der konstruktive Einsatz ist möglich. Weitere Angaben sind in [1] bis [9] enthalten.

## 5.5.2 Holzarten

Die Holzarten lassen sich aufgrund ihres unterschiedlichen biologischen Aufbaus in zwei Gruppen einteilen: Nadel- und Laubhölzer. In Tab. 5.5.1 sind die gebräuchlichsten europäischen Bauholzarten mit ihren wichtigsten Eigenschaften und Anwendungsgebieten dargestellt. Die überseeischen Nadelhölzer (Pitchpine, Oregonpine etc.) sind viel gerad- und langwüchsiger, fäulnisunempfindlicher und weniger astreich als die einheimischen Nadelbäume und kommen daher vermehrt zur Anwendung. Nichteuropäische Laubholzarten werden vorwiegend als edle Furnierhölzer und für spezielle Aufgaben im Innen- und Außenbereich eingesetzt (siehe Tab. 5.5.2).

Tab. 5.5.1 Übersicht über die gebräuchlichsten europäischen Bauholzarten

Holzart	Eigenschaften	Merkmale	Anwendungsgebiet
Fichte R	geradwüchsig, leicht bearbeitbar, wenig Äste, ohne Holzschutz nicht witterungsfest	Kern und Splint gelblich-weiß, Rinde rötlich, schwach borkig	Konstruktionsholz für Innen- und Außenanwendung, Brettschichtholz, Verkleidungen, Fußböden
Tanne R	s. Fichte	Kern und Splint gelblich-weiß, Rinde grau, schuppig	s. Fichte
Kiefer (Föhre) K	harzreich, mehrästig, widerstandsfähiger gegen Fäulnis als Tanne und Fichte	rotbrauner Kern, heller Splint, Rinde oben glatt, gelbbrot, unten borkig, rötlich-grau	Konstruktions-, Fenster- und Türholz, Fußböden, Verkleidungen
Lärche K	harzreich, (aber ohne Harzfluß), arbeitet wenig	rotbrauner Kern, gelber Splint, Rinde grau, unten sehr borkig	s. Kiefer
Buche (Rot-) R	sehr fäulnisempfindlich, schlecht bearbeitbar	Kern und Splint gelblich bis rötlich, Rinde glatt, silbergrau	Schwellen, Fußböden, Sperrholz, Furnierholz
Eiche K	gut verarbeitbar, sehr dauerhaft, auch unter Wasser und im Wechsel trocken/naß, geringes Quell- und Schwindmaß	brauner Kern, grauer Splint (nicht verwendbar); borkige, rissige Rinde	Treppen, Fußböden, Furniere, Schwellen, Wasserbau, Brückenbau

K = Kernholzbaum, R = Reifholzbaum

Tab. 5.5.2 Nichteuropäische Laubholzarten

Holzart	Eigenschaften	Anwendungsgebiet
Teakholz (Afrika) Pockholz (Südamerika)	engwüchsig, fäulnisunempfindlich, hohe Rohdichte	Tischlerholz, für hochbeanspruchte Holzbauteile, Innenraumgestaltung, Möbelbau
Quebracho, Samario (Südamerika) Eisenholz (Afrika)	fäulnisbeständig, resistent gegen aggressive Wässer, hohe Rohdichte	Wasserbau, Brückenbau
Macoré, Mahagoni, Nußbaum, Okoumé, Palisander		Furnierhölzer

## 5.5.3 Aufbau des Holzes

### 5.5.3.1 Chemische Zusammensetzung

Trockenes Holz besteht aus (in Massen-%)

40 bis 60% Cellulose  
20 bis 30% Lignin  
20% Hemicellulose oder begleitenden Kohlehydraten  
6% celluloseähnlichen Polysacchariden  
2,5% Harz und Asche

Die Cellulose bildet das tragende Gerüst des Holzes (Holzfaser). Sie besteht aus fadenförmigen Makromolekülen, die teils geordnet kristallin, teils ungeordnet gelagert sind und einen hohen Polymerisationsgrad ( $n = 1000-2000$ ) besitzen.

Die Hemicellulosen werden ebenfalls von Makromolekülen gebildet, deren Polymerisationsgrad jedoch geringer ist. Sie wirken als Gerüst- und Reservestoffe.

Lignin ist ein makromolekularer polymerisierter Alkohol, der nach Abschluß des Zellwachstums als Kittsubstanz die Gerüststoffe verbindet und dadurch die mechanische und thermische Stabilität des Cellulosegerüsts bewirkt.

### 5.5.3.2 Biologischer Aufbau

#### Makroskopischer Aufbau

Der makroskopische Aufbau des Holzes läßt sich am einfachsten an drei Schnitten durch einen Holzstamm erkennen (Bild 5.5.1). Im Hirnschnitt eines Stammes sind folgende Schichten von außen nach innen zu unterscheiden: Borke, Bast, Kambium, Holzmasse und Mark.

Die Außenrinde oder Borke ist eine narbige und rissige Schutzschicht aus abgestorbenen Zellen.

Die Bastzellen werden vom Kambium an seiner Außenseite produziert; sie stellen den lebenden Innenteil der Rinde dar. Zwischen Rinde und Holzmasse liegt das Kambium, eine dünne Schicht lebender, teilungsfähiger Zellen, von der aus das Dickenwachstum des Baumes erfolgt.

Der zeitliche Verlauf des Wachstums (Alter des Baumes) kann anhand der Jahresringe verfolgt werden. In den gemäßigten Klimazonen bilden sich im Frühjahr dünnwandige, weite Zellen, im Herbst entstehen kleinere Röhrenzellen mit dicken Wandungen. Ein Jahresring besteht somit aus dem helleren, weichen Frühholz und dem dunkleren, harten Spätholz. Die Breite der Jahresringe und die Anteile des Früh- und Spätholzes sind umweltabhängig. Von Einfluß auf das Wachstum der Bäume sind vor allem Bodenbeschaffenheit, klimatische Verhältnisse, Baumalter und Schädlingswirkungen. Die Holzmasse wird aus den jährlich zuwachsenden Zellen gebildet. Bei einigen Holzarten kann man, etwa ab dem 20. bis 40. Lebensjahr, zwischen einer dunkel gefärbten Innenzone, dem Kern, und einem hellfarbigen, schmalen Außenbereich, dem Splint, unterscheiden. Das Kernholz entsteht durch Veränderungen der Holzzellen, wobei zunächst die Zellverbindungen und damit die Transportbahnen unterbrochen werden. Die stillgelegten Zellen reichern sich mit Fetten, Harzen, Gerb- und Farbstoffen an und sterben ab. Durch die Verfüllung der Zellhohlräume erhält der Kern eine größere Rohdichte, eine höhere Festigkeit und eine bessere Widerstandsfähigkeit gegen Schädlingsbefall als das weiche, noch lebende Splintholz.

Das Mark, im Zentrum des Stammes, besteht aus weichen, abgestorbenen Holzzellen.

Die vom Kambium zum Mark verlaufenden Markstrahlen dienen als Speicherzellen bzw. transportieren die Aufbau- stoffe in horizontaler Richtung.

#### Mikroskopischer Aufbau

Im mikroskopischen Aufbau besteht Holz aus vorwiegend in Stammlängsrichtung verlaufenden Zellen, die durch ihre röhrenbündelartige Anordnung die faserige Struktur des Holzes bilden.

Nadelhölzer sind i.w. aus einer Zellart, den Tracheiden, aufgebaut, die alle Funktionen übernehmen. Die dünnwandigen, weitlumigen Tracheiden des Frühholzes dienen dem Flüssigkeitstransport, die dickwandigen, englumigen Spätholztracheiden tragen maßgeblich zur Festigkeit bei.

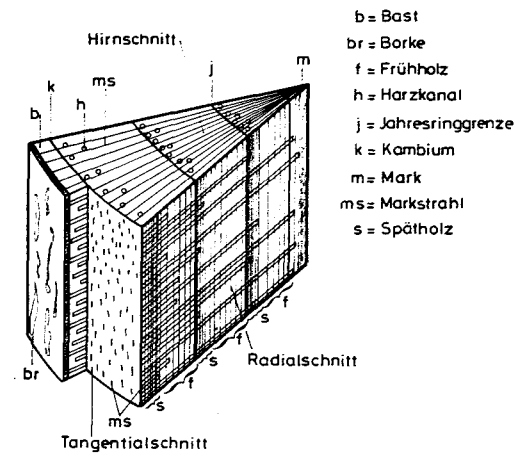


Bild 5.5.1 Keilstück aus einem vierjährigen Kiefernstamm (nach Strasburger)

Bei Laubhölzern sind die Aufgaben auf mehrere Zellarten verteilt. Röhrenförmige Gefäße, die Tracheen, besorgen die Leitung des Wassers und der Nährstoffe. Den Hauptanteil des Laubholzes bilden die schmalen, zugespitzten Sklerenchym- oder Librifasern, die als Stützzellen für die Festigkeit des Holzes maßgebend sind. Beide Holzarten besitzen außerdem längliche, dünnwandige Parenchymzellen (Markstrahlzellen), die vom Kambium durch Teilung produziert werden. Sie dienen zur Speicherung und zum Transport von Nährstoffen.

### 5.5.3.3 Holzfehler

Als Naturprodukt weist Holz Fehler auf, die die baupraktische Verwendungsmöglichkeit mitbestimmen. Hierbei handelt es sich vor allem um Wuchsfehler und um Fehler aus äußeren Einwirkungen (Risse, Schädlingsbefall). Als Beispiele für Holzfehler werden hier der Drehwuchs und die Ästigkeit gezeigt (s. Bild 5.5.2), die auf die Festigkeitseigenschaften einen starken negativen Einfluß ausüben. Als Drehwuchs bezeichnet man den spiralförmigen Verlauf der Holzfasern um die Stammachse. Ästigkeit gilt als Fehler, wenn die Äste im Holz nicht fest verwachsen sind oder wenn abgestorbene Äste in das Stammholz einwachsen (Durchfalläste). Weitere Arten von Holzfehlern sind in [7] beschrieben.

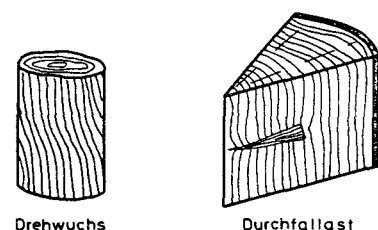


Bild 5.5.2 Beispiele für Holzfehler

## 5.5.4 Physikalische und mechanische Eigenschaften von Vollholz

### 5.5.4.1 Physikalische Eigenschaften

#### Dichten

Während die Reindichte mit etwa  $1,55 \text{ g/cm}^3$  bei allen Hölzern praktisch gleich ist, schwankt die Rohdichte in Abhängigkeit von der Holzart, von der Probeentnahmestelle, vom Feuchtegehalt u.a.m. stark. Die Angabe der Rohdichte erfolgt daher stets mit dem zugehörigen Feuchtegehalt. Üblich ist die Angabe der Rohdichte im luftgetrockneten Zustand  $\rho_{12}$  (12 M.-% Feuchtigkeitsgehalt) [8].

#### Feuchtigkeitsgehalt

Der Feuchtigkeitsgehalt des Holzes schwankt zwischen i. M. 40–60 M.-% bei frisch geschlagenem Holz und 0 M.-% im darrtrockenen Zustand. Bis zum Fasersättigungspunkt, der bei etwa 30 M.-% liegt, nimmt trockenes Holz Wasser in Form von Dampf aus der Atmosphäre auf. In diesem als hygroskopisch bezeichneten Bereich ist der Feuchtigkeitsgehalt somit von der relativen Luftfeuchte und der Umgebungstemperatur abhängig. Oberhalb des Fasersättigungspunktes füllen sich die Zellhohlräume mit freiem Wasser (kapillarer Bereich). Die Prüfung der Holzfeuchte erfolgt nach [N 9].

#### Quellen und Schwinden

Änderungen des Feuchtigkeitsgehaltes der Holzfasern (d.h. im Bereich unterhalb 30 M.-%) bewirken Formänderungen des Holzes, die als Schwinden bzw. Quellen bezeichnet werden. Oberhalb des Sättigungspunktes nehmen die Formänderungen praktisch nicht mehr zu (Bild 5.5.3). Die Schwind- und Quellmaße werden stark von der Rohdichte beeinflusst, da mit zunehmender Rohdichte der Gehalt an Zellmasse und damit die Feuchtesorption steigt.

Die Quell- und Schwindmaße weisen in den drei Hauptrichtungen (axial = Längsrichtung des Stammes; radial = normal zur Längsrichtung; tangential = in Stammumfangsrichtung) beträchtliche Unterschiede auf. Tangential liegen die Werte bei 5 bis 10%, radial bei 3 bis 5% und in axialer Richtung bei 0,2 bis 0,5%. Dieses unterschiedliche Verhalten kann beim Trocknen des Holzes Verzerrungen hervorrufen, die beim Einbau in Bauteile zu beachten sind (Bild 5.5.4). Im Gegensatz zu Beton ist das Schwinden und Quellen von Holz weitgehend reversibel und kommt ohne Schutzmaßnahmen praktisch nie zum Stillstand. Die Bestimmung der Feuchtedehnungen erfolgt nach [N 10].

#### Thermische Holzeigenschaften

Der Wärmeausdehnungskoeffizient und die Wärmeleitfähigkeit werden wesentlich durch die Anisotropie des Holzgefüges beeinflusst. So sind die Wärmedehnung und die Wärmeleitfähigkeit in Faserrichtung gering. Quer zur Faser beträgt der Wärmeausdehnungskoeffizient  $\alpha = 3 \text{ bis } 6 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  etwa das Zehnfache wie in Längsrichtung. Die Wärmeleitfähigkeit steigt mit zunehmender Rohdichte und zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt. Quer zur Faser kann man mit einem Wert  $\lambda = 0,14 \text{ bis } 0,18 \text{ W/mK}$  rechnen, der wesentlich niedriger ist als bei den meisten anorganischen Baustoffen.

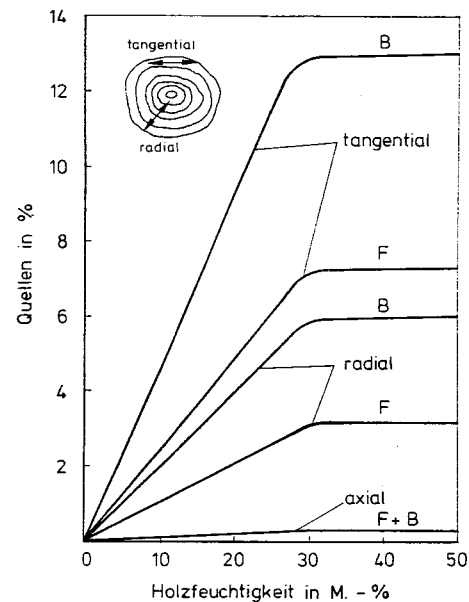


Bild 5.5.3 Quellen in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit für Fichte (F) und Buche (B)

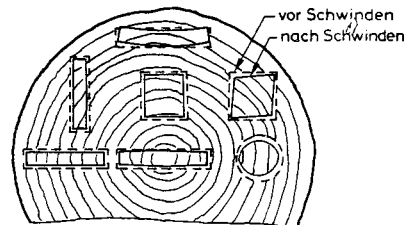


Bild 5.5.4 Verformungen infolge Schwindens

### 5.5.4.2 Festigkeit und Verformbarkeit

Die Festigkeits- und Verformbarkeitseigenschaften von Holz werden maßgeblich durch seine anisotrope Struktur bestimmt. In Tab. 5.5.3 sind die wichtigsten Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen in Abhängigkeit von der Rohdichte  $\rho_{12}$  zusammengestellt. Abschn. 5.5.8 enthält die wichtigsten Prüfnormen.

#### Festigkeitseigenschaften

Aufgrund des anisotropen, in Stammlängsrichtung orientierten Gefüges besitzt Holz parallel zur Faser gute mechanische Festigkeitseigenschaften. Dabei erreicht die Zugfestigkeit etwa das Doppelte der Druckfestigkeit. Wie Bild 5.5.5 zeigt, werden Holzbauteile, z.B. bei Anschlüssen, jedoch häufig unter verschiedenen Winkeln zur Faserrichtung belastet. Bei einer solchen Beanspruchung fallen die Festigkeiten mit zunehmendem Faser-Last-Winkel stark ab (s. Bild 5.5.6). Für beliebige Winkel  $\alpha$  läßt sich die zugehörige Festigkeit bei bekannten Grenzwerten  $\sigma_{||}$  und  $\sigma_{\perp}$  näherungsweise durch folgende Formel berechnen:

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_{||} \cdot \sigma_{\perp}}{\sigma_{||} \cdot \sin^n \alpha + \sigma_{\perp} \cos^n \alpha} \quad (5.5.1)$$

$n = 1,5 - 2$  bei Zug Z  
 $n = 2,5$  bei Druck D  
 $n = 2$  bei Biegung B

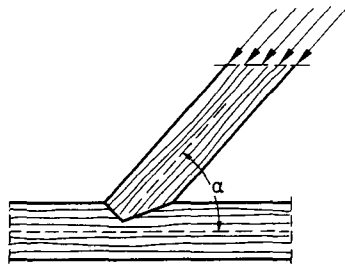


Bild 5.5.5 Lastangriff unter einem Winkel  $\alpha$  (Versatz)

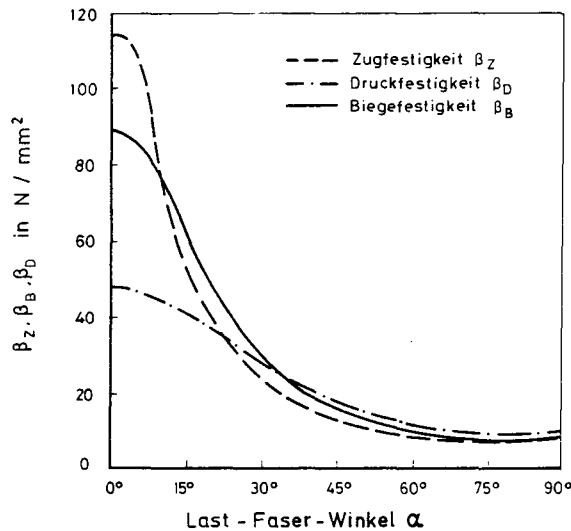


Bild 5.5.6 Abhängigkeit der Festigkeitseigenschaften vom Faser-Last-Winkel  $\alpha$  bei Tannenholz

Bei Druckbeanspruchung quer zur Faser ist der Festigkeitsverlust auf das Zusammendrücken der in Röhrenbündeln angeordneten Holzzellen zurückzuführen. Da die Zellen bei Querdruck bis zur Porenfreiheit verdichtet werden können und sich daher häufig keine Druckfestigkeit definieren läßt, wird der Querdruckversuch nach [N 16] bei einer Stauchung von 1% ausgewertet.

Die Querkzugfestigkeit kann zwar an kleinen, fehlerfreien Holzproben ermittelt werden, sinkt aber im praktischen Anwendungsfall durch unvermeidliche Schwindrisse fast bis auf Null.

Die Biegefestigkeit von Holz wird bei der Werkstoffprüfung unter der Annahme einer linearen symmetrischen Spannungsverteilung berechnet, obwohl diese Voraussetzung nur bei geringer Beanspruchung gültig ist. Bei höheren Beanspruchungen besteht keine Proportionalität zwischen Dehnung und Spannung; es stellt sich eine über den Querschnitt ungleichförmige Spannungsverteilung ein (Bild 5.5.7).

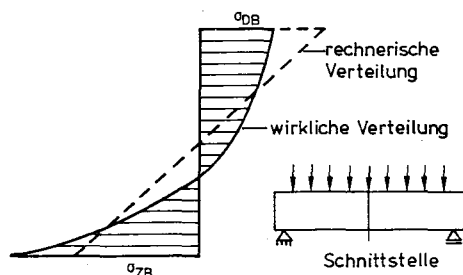


Bild 5.5.7 Spannungsverteilung in einem biegebeanspruchten Vollquerschnitt

Die Festigkeitseigenschaften von Holz werden – außer vom Faser-Last-Winkel – durch Feuchtigkeitsgehalt, Rohdichte, Temperatur und Holzfehler beeinflusst.

So erhöhen sich die Festigkeitswerte mit zunehmender Rohdichte (Bild 5.5.8), während sie bei steigender Temperatur abnehmen. Der Feuchtigkeitsgehalt von Holz hat auf die Druckfestigkeit einen wesentlich größeren Einfluß als auf die Zugfestigkeit. Wie Bild 5.5.9 zeigt, ergibt sich unterhalb des Fasersättigungspunktes mit zunehmender Feuchte eine stärkere Abnahme von  $\beta_D$  und  $\beta_B$  als vergleichsweise von  $\beta_Z$ .

Holzfehler, wie z. B. Äste stören den Faserverlauf und verursachen somit Festigkeitsverluste. Bei stark ästigem Kiefernholz kann die Zugfestigkeit um etwa 85% sinken. Die Druckfestigkeit wird in geringerem Maße (Abnahme  $\approx 22\%$  bei Kiefernholz) beeinträchtigt, da festverwachsene Äste die Druckkräfte gewissermaßen aufnehmen.

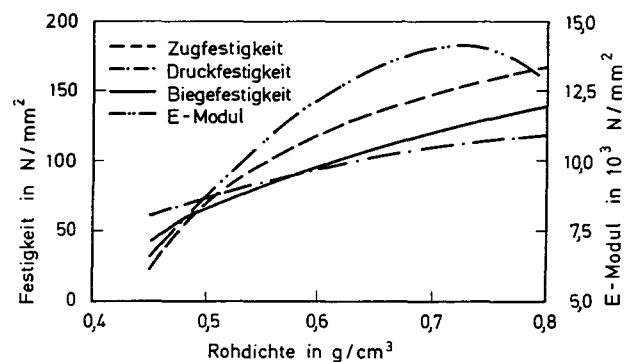


Bild 5.5.8 Abhängigkeit der Festigkeitseigenschaften und des E-Moduls von der Rohdichte (Eschenholz)

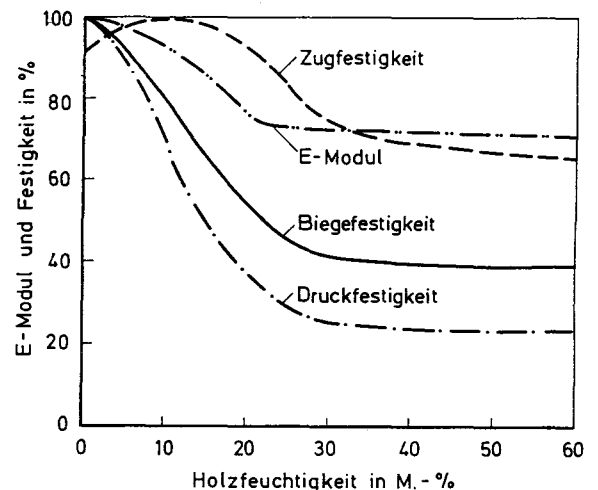


Bild 5.5.9 Abhängigkeit des E-Moduls und der Festigkeiten von der Feuchtigkeit bei Nadelholz

#### Verformungseigenschaften

Das Verformungsverhalten von Holz bei Zug- bzw. Druckbeanspruchung ist aus Bild 5.5.10 ersichtlich. Die Spannungsdehnungslinie für Zug verläuft bis zum Bruch nahezu geradlinig, während bei Druckbeanspruchung eine Proportionalitätsgrenze festzustellen ist, die bei etwa 80% der Druckfestigkeit liegt. Oberhalb dieser Grenze kommt es zu plastischen Verformungen. Obwohl bei niedrigeren Span-

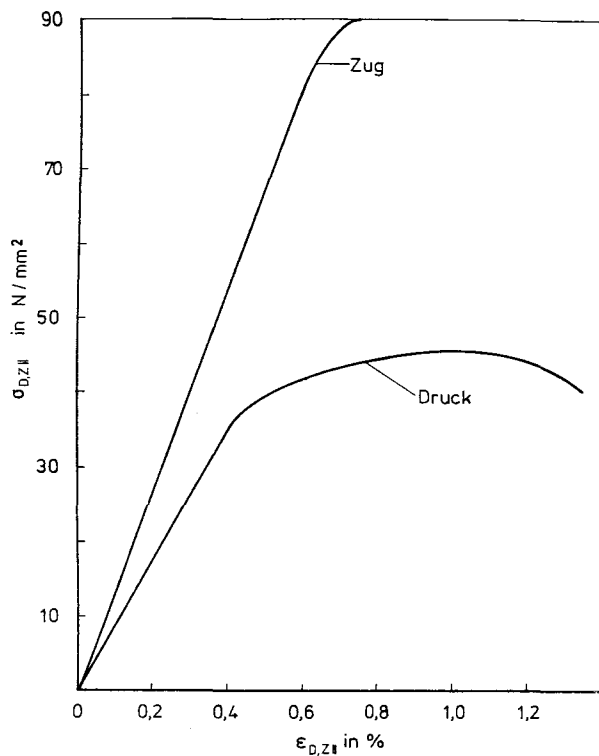


Bild 5.5.10 Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Zug- und Druckbeanspruchung von Vollholz parallel zur Faser (Beispiel)

nungen schon geringe bleibende Verformungen auftreten, kann bis zum Erreichen der Proportionalitätsgrenze mit dem Hooke'schen Gesetz gerechnet werden.

Für den E-Modul bestehen ähnliche Abhängigkeiten wie für die Festigkeitseigenschaften vom Faser-Last-Winkel, von der Rohdichte (Bild 5.5.8), von der Feuchtigkeit (Bild 5.5.9), von den Holzfehlern und von der Temperatur. Analog zu Glg. 5.5.1 kann die Abhängigkeit des E-Moduls vom Faser-Last-Winkel  $\alpha$  berechnet werden zu:

$$E_{\alpha} = \frac{E_{||} \cdot E_{\perp}}{E_{||} \sin^3 \alpha + E_{\perp} \cos^3 \alpha} \quad (5.5.2)$$

Bei konstant wirkenden Dauerbelastungen tritt zu der elastischen Verformung  $\epsilon_{el}$  eine zeitabhängige plastische Verformung  $\epsilon_K$  (Kriechen) hinzu. Aus dem Verlauf der Verformungs-Zeit-Kurven (Bild 5.5.11) geht hervor, daß die Kriechverformungen bei Belastungsbeginn stark ansteigen und nach rd. einem Jahr einen Grenzwert erreichen. Bei

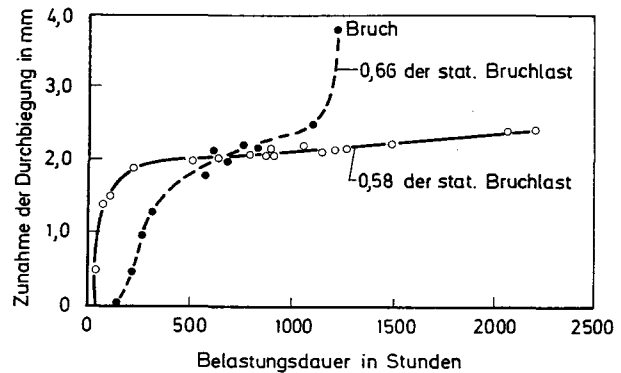


Bild 5.5.11 Verformungszeitkurve bei langdauernder statischer Biegebelastung von Balsaholzbalken nach [7]

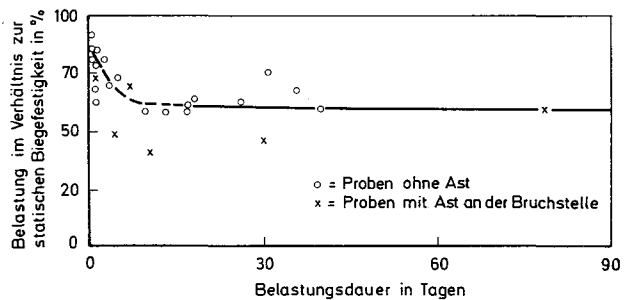


Bild 5.5.12 Dauerstandfestigkeit von Tannenholzbalken unter Biegebeanspruchung nach [7]

Tab. 5.5.3 Mechanische Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen

Holzart bzw. Holzwerkstoff	$\rho_{12}$ g/cm <sup>3</sup>	E-Modul N/mm <sup>2</sup>	Zugfestigkeit $\beta_Z$ N/mm <sup>2</sup>	Druckfestigkeit $\beta_D$ N/mm <sup>2</sup>	Biegefestigkeit $\beta_B$ N/mm <sup>2</sup>
europ. Nadelholz	0,45–0,59	11000–14000 450–550	84–107 2,3–3,0	47–55 5,8–7,7	73–100
europ. Laubholz	0,69–0,83	13000–16500 1000–1500	90–165 4,0–7,0	52–82 8,0–12,0	110–160
Preßschichtholz	1,0–1,4	15000–31100 3100–4200	140–360 –	60–216 30–90	130–354
Sperrholz	0,71–0,95	9200–13300 2600–3600	41–177 –	53–62 –	100–120
Holzspanplatten	0,50–0,90 (halbschwer)	2000–4500	5–13 0,3–0,7	8–16 1,3–3,4	10–26
Holzfaserstoffe (weich)	0,20–0,24	200–400	1,0–2,3 –	1,3–2,3 –	1,7–3,5
Holzfaserstoffe (hart)	0,90–1,10	3300–10000	22,5–49 –	24–55 155–220	43–83



über den Gebrauchsspannungen liegenden Beanspruchungen wachsen die Verformungen schnell an und führen schließlich zum Bruch des Balkens. Der Verlauf der Kriechkurven ist von Art und Höhe der Belastung, von Feuchtigkeitsveränderungen und wiederholten Be- und Entlastungen abhängig, deren Einflüsse bislang noch nicht genügend geklärt sind. Da aber die Kriechmaße im Verhältnis zu Schwind- und Quellmaßen gering sind, werden sie nur selten, und zwar näherungsweise durch Abminderung des E-Moduls berücksichtigt.

Der große Einfluß der Spannungsdauer auf das mechanische Verhalten von Holz geht aus Bild 5.5.12 hervor. Es zeigt, daß die Dauerstandfestigkeit von Vollholz unter Biegebeanspruchung nur etwa 60% der Kurzzeitfestigkeit beträgt.

## 5.5.5 Holz und Holzwerkstoffe, Sorten und Arten

### 5.5.5.1 Gütebedingungen

Bauschnitthölzer und Baurundhölzer werden im Bauwesen nach DIN 4074 [N 4] in drei Güteklassen unterteilt:

Güteklasse I: Bauholz mit besonders hoher Tragfähigkeit

Güteklasse II: Bauholz mit gewöhnlicher Tragfähigkeit

Güteklasse III: Bauholz mit geringer Tragfähigkeit

Die Einteilung erfolgt dabei nach den Güteeigenschaften der Hölzer wie allgemeine Beschaffenheit, Schnittklasse, Maßhaltigkeit, Feuchtigkeitsgehalt und Wuchseigenschaften. In den Bemessungsnormen [N 1] und [N 2] sind entsprechend den Güteklassen zulässige Spannungen festgelegt. Abschn. 5.5.9 enthält die wesentlichen Normen für Bauhölzer.

### 5.5.5.2 Vollholz

#### Bauholz

Als Vollholz gilt Holz, das nach einer nur mechanischen Bearbeitung (Sägen, Hobeln) verwendet wird. Lieferformen des Bauholzes sind dabei Baurundholz und Bauschnittholz. Als Baurundholz werden von Rinde und Bast befreite Stämme bezeichnet, die hauptsächlich im Gerüstbau eingesetzt werden. Im allgemeinen wird das Rohholz jedoch zu Schnittholz verarbeitet, das man nach den Querschnittsabmessungen in Kantholz, Bohlen, Bretter und Latten unterteilt. Nach der zulässigen Breite der Baumkanten und nach der Mindestbreite der baumkantenfreien Querschnittseiten werden nach [N 4] vier Schnittklassen unterschieden, die in Bild 5.5.13 dargestellt sind.

#### Vergütetes Vollholz

Die Anisotropie und das hygroskopische Verhalten von Holz beeinträchtigen teilweise seine Verwendbarkeit. Durch Weiterbehandlung (Vergüten) sollen diese nachteiligen Eigenschaften verbessert werden.

Vollholz kann für Spezialzwecke durch Pressen, Formen oder Tränken behandelt werden.

Preßvollholz entsteht durch Druckverdichten senkrecht zur Faser. Ziel dieser Behandlung ist es, die Zellhohlräume weitgehend zu schließen, um die Rohdichte und damit die Festigkeit zu erhöhen. Preßvollhölzer werden als Lager-, Beschlag- und verschleißfeste Maschinenteile eingesetzt. Unter Formvollholz (Biegeholz) versteht man unter Dampf im Vakuum erweichtes und dann in Faserlängsrichtung gestauchtes Holz, wodurch eine bleibende Biegsamkeit erzielt wird (Verwendung für gebogene Teile im Möbel-, Flugzeug- und Fahrzeugbau).

Schnittklasse		Größe zulässige Breite der Baumkante als Bruchteil der größten Querschnittsabmessung (schräg gemessen)	Vollhölzer (Ganzhölzer)	Halbhölzer	Viertelhölzer
S <sub>1)</sub>	scharfkantig	Baumkanten nicht zulässig			
A	vollkantig	1/8, wobei in jedem Querschnitt mindestens 2/3 jeder Querschnittsseite von Baumkante frei sein muß			
B	fehlkantig	1/3, wobei in jedem Querschnitt mindestens 1/3 jeder Querschnittsseite von Baumkante frei sein muß			
C	sägegestreift	Muß an allen vier Seiten durchlaufend von der Säge gestreift sein			

1) Sonderschnittklasse

Bild 5.5.13 Schnittklassen von Bauholz

Tränkvollholz entsteht durch geeignete Behandlung mit Kunstharz, Paraffin, Wachs, Öl oder flüssigem Metall. Dadurch werden die physikalischen Eigenschaften, die Formbeständigkeit sowie der Widerstand gegen Schädlingsbefall verbessert.

### 5.5.5.3 Holzwerkstoffe

Unter Holzwerkstoffen werden aus Furnieren, Spänen oder Fasern industriell hergestellte Produkte verstanden. Aus der Übersicht (Bild 5.5.14) sind die Herstellungsarten und die Endprodukte ersichtlich. Nach dem Grad der Rohstoffzerlegung lassen sich Lagenholz, Holzspan- und Holzfaserverwerkstoffe unterscheiden.

#### a) Lagenholz

Lagenholz ist der Oberbegriff für Holzwerkstoffe, die aus mehreren verleimten Lamellen (Einzelbretter, Furniere) aufgebaut sind. Man unterscheidet zwischen unverdichteten und verdichteten (gepreßten) Lagenhölzern. In Abschn. 5.5.9 sind die Holzwerkstoffnormen aufgeführt.

#### a1) Unverdichtetes Lagenholz

##### Sperrholz

Sperrhölzer sind Platten aus mindestens drei kreuzweise aufeinander geleimten Holzlagen; sie werden in Furnier- und Tischlerplatten unterteilt (s. Bild 5.5.15).

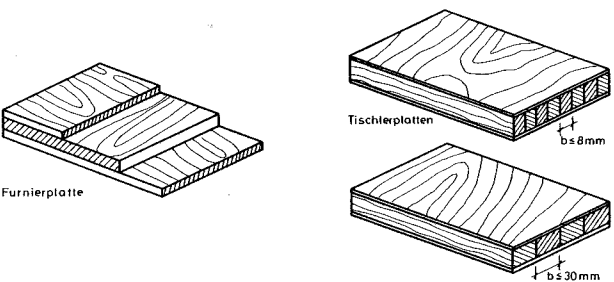


Bild 5.5.15 Aufbau von Bau-Furnier- und Bau-Tischlerplatten

Furnierplatten bestehen i.a. aus einer ungeraden Anzahl von aufeinander geleimten, in den Faserrichtungen jeweils um 90° versetzten Furnieren, wobei die außenliegenden Decklagen gleichgerichteten Faserverlauf aufweisen. Durch die kreuzweise Lage der Furniere wird ein gewisser Ausgleich der Anisotropie erzielt, so daß die Festigkeits- und Verformungseigenschaften in beiden Plattenrichtungen etwa gleich sind. Der E-Modul und die Festigkeiten werden vom Faser-Last-Winkel in Plattenebene und von der Anzahl der Lagen beeinflusst. Bei einem Kraftangriff unter 45° werden die Fasern aller Furnierlagen unter dem gleichen Winkel geschnitten, so daß hier die niedrigsten Werte erreicht werden (s. Bild 5.5.16). Bau-Furnierplatten werden für Stege von Konstruktionsbauteilen sowie als Schalungen eingesetzt. Bau-Tischlerplatten bestehen aus beidseitigem Deckfurnier und einer Mittellage aus aneinander geleimten Holzleisten oder -stäbchen. Sie werden im Bauwesen für Schalungen verwendet.

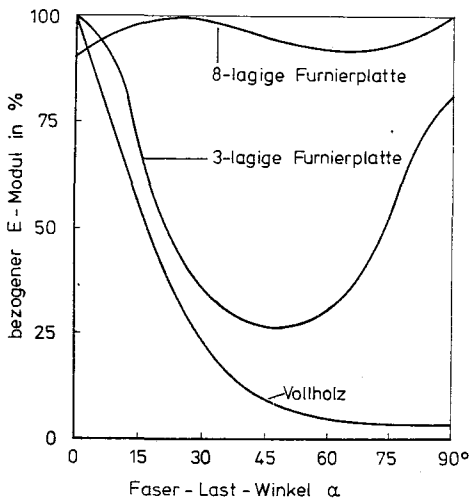


Bild 5.5.16 Abhängigkeit des E-Moduls vom Faser-Last-Winkel bei Furnierplatten und Vollholz

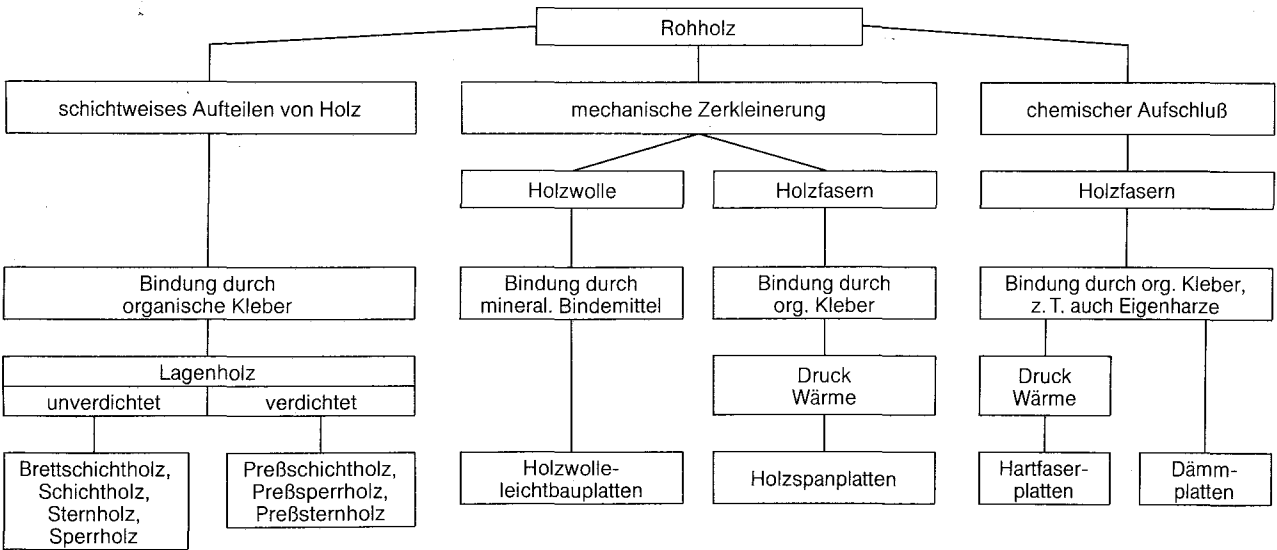


Bild 5.5.14 Übersicht über gebräuchliche Holzwerkstoffe

Neben den üblichen Furnierplatten gibt es Sternholz, bei dem die Faserrichtungen der einzelnen Furniere sternförmig im Winkel von 15 bis 45° versetzt sind, um einen Anisotropieausgleich zu erzielen.

#### Brettschichtholz

besteht aus Einzelbrettern, die künstlich getrocknet und anschließend unter Druck verleimt werden (s. Bild 5.5.17). Aus Brettschichtholz lassen sich vielfältige Querschnitte für Stützen, Träger und Rahmen herstellen (s. Bild 5.5.18). Es wird heute vielfältig eingesetzt, z.B. als Binder für Sporthallen.

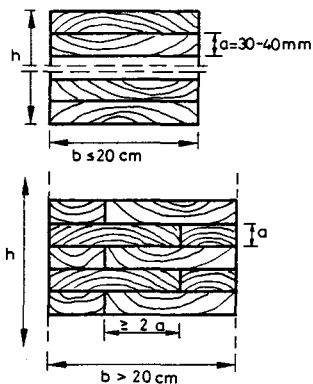


Bild 5.5.17 Aufbau von Brettschichtholz

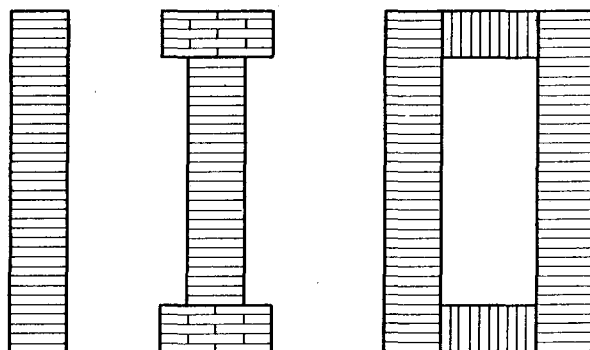


Bild 5.5.18 Querschnittsbeispiele für Stützen, Träger und Rahmen aus Brettschichtholz

#### a2) Verdichtetes Lagenholz

Verdichtete Lagenhölzer sind parallelfaserig, kreuzweise oder sternförmig aufeinander gelegte, dünne, mit Kunstharz getränkte Furniere, die unter Druck und Hitze zu Platten verpreßt werden (Preßschichtholz, Preßsperrholz, Preßsternholz).

#### b) Spanwerkstoffe

##### Spanplatten

bestehen aus Holzspänen und/oder anderen holzartigen Faserstoffen, die mit einem Bindemittel unter Druck und Hitze verleimt werden. Die Eigenschaften der Platten hängen von der Art und Menge des Bindemittels, vom Preßdruck sowie von Spanform und -größe ab. Die Zug- und Druckfestigkeiten in Plattenebene liegen zwischen 5 und 16 N/mm<sup>2</sup>, die Biegefestigkeit senkrecht zur Plattenebene etwas höher (8–26 N/mm<sup>2</sup>). Hohe Dauerbeanspruchungen

erzeugen Kriechen und Festigkeitsverluste. Spanplatten werden als Dach- und Deckentafeln, sowie im Möbelbau, etc. eingesetzt.

#### Strand- und Waferboard

sind plattenförmige Holzwerkstoffe aus orientiert gestreuten schmalen, streifenartigen (Strandboard) oder großflächigen Spänen (Waferboard). Durch um jeweils 90° versetzte Orientierungsrichtungen der einzelnen Lagen sind die Eigenschaften von Furnierholz erreichbar. Im Vergleich zu Spanplatten besitzen sie verbesserte Festigkeitseigenschaften.

#### Holzwoleplatten

Holzwoleleichtbauplatten werden aus Holzwole und mineralischen Bindemitteln (Magnesitmörtel, Zement oder Gips) hergestellt und in Formen gepreßt. Sie werden als Wärmedämmstoffe sowie für Bekleidungen und leichte Trennwände eingesetzt.

#### c) Faserwerkstoffe

Für die Herstellung von Faserplatten werden Holz, Holzabfälle bzw. pflanzliche Faserstoffe in Schnitzel zerkleinert, in Wasserdampf aufgeschlossen und gemahlen. Anschließend wird die Fasermasse unter Nutzung holzeigener Bindungskräfte oder mit Bindemittel verpreßt. So entstehen poröse Faserplatten mit einer Rohdichte von 0,25–0,35 g/cm<sup>3</sup>, die als Dämmplatten für den Wärme- und Schallschutz Verwendung finden. Beim Verdichten und Aushärten unter Druck und Wärme entstehen mittelharte bzw. harte Platten mit Rohdichten von 0,35–0,80 g/cm<sup>3</sup> und höher. Hartfaserplatten besitzen in allen Plattenrichtungen annähernd gleiche Festigkeits- und Verformungswerte. Sie werden als Schalung für Verkleidungen etc. eingesetzt.

## 5.5.6 Holzschutz

Unsachgemäßer Einbau oder ungünstige Umgebungsbedingungen können zu Schädigungen des Holzes führen. Aufgabe des Holzschutzes ist es daher, durch entsprechende konstruktive und chemische Maßnahmen Schaden zu verhüten, d. h. die Gebrauchsfähigkeit des Holzes während seiner Lebensdauer zu erhalten [N 5 und N 29].

### 5.5.6.1 Schadeinflüsse

Die maßgeblichen Schadeinflüsse sind: pflanzlicher und tierischer Schädlingsbefall, Witterungseinfluß, chemische Beanspruchungen sowie hohe Temperaturen (Brandfall). Tab. 5.5.4 enthält eine Übersicht über die wichtigsten Schadeinflüsse, deren Auswirkungen sowie mögliche Schutzmaßnahmen.

#### Pflanzlicher und tierischer Schädlingsbefall

Die wichtigsten pflanzlichen Schädlinge sind die Pilze. Günstige Bedingungen für das Pilzwachstum sind ein Holzfeuchtigkeitsgehalt von etwa 20 bis 40% und Temperaturen zwischen 18 und 35 °C. Trockenes Holz oder ständig durchfeuchtetes Holz wird von Pilzen nicht befallen. Viele Pilzar-

Tab. 5.5.4 Schadeinflüsse, ihre Auswirkungen und mögliche Schutzmaßnahmen

Schadeinfluß	Auswirkung	Schutzmaßnahme
holzverfärbende Pilze	Verfärbung	geeignete Holzart, konstruktiver und chemischer Holzschutz
holzerstörende Pilze	Zerstörung	
Insekten		
hohe Temperaturen		Oberflächenbehandlung, Beschichtung
Witterung	Verfärbung, Oberflächenzerstörung, Formänderung	
Chemische Einflüsse	Verfärbung, Zerstörung	

ten können jedoch Trocken- und Kaltperioden überstehen. Die Pilze können nach dem Schadensbild in holzverfärbende und holzerstörende Pilze eingeteilt werden. Holzverfärbende Pilze leben von Zellinhaltsstoffen, greifen die Zellwände jedoch nicht an, so daß die Festigkeitseigenschaften kaum beeinträchtigt werden. Holzerstörende Pilze bauen die Cellulose der Zellwände (Destruktionsfäule) oder das Lignin (Korrosionsfäule) ab und bewirken somit eine Zerstörung der Holzsubstanz durch »Fäulnis« (gefährlichster Pilz ist der Echte Hausschwamm).

Tierische Schädlinge zerstören das Holz durch Anlegen von Fraß- und Brutgängen. Zu den Trockenholzinsekten, die vorwiegend lufttrockenes Holz befallen, gehören Bockkäfer, Poch- und Splintholzkäfer. Frischholzschildlinge befallen nur frisches, noch nicht getrocknetes Holz. Sie ernähren sich von selbst angelegten Pilzkulturen, die nur in frischem Holz lebensfähig sind. In angetrocknetem Holz sterben die Insekten ab, da ihnen die Nahrungsgrundlage entzogen ist. Zu den Frischholzschildlingen gehören holzbrütende Borkenkäfer und Holzwespen. Tab. 5.5.5 gibt eine Übersicht über wichtige Holzschädlinge.

Tab. 5.5.5 Einige wichtige Holzschädlinge

Schädlinge	Vorkommen	Lebensbedingungen	Schadensbild	Bekämpfung
Bläuepilz	vorwiegend Nadel-, aber auch Laubholz, auf frisch gefälltem und lagerndem Holz	Holzfeuchte > 20%	blaugraue bis schwärzliche Verfärbungen, dadurch Wertminderung	künstliche Holztrocknung, Schutzmittel
Echter Hausschwamm	Laub- und Nadelholz, Altbauten, Masten	18–22 °C, 20–28% Holzfeuchte, Zuwachsstillstand bei 26 °C	Destruktionsfäule, rotbraune Verfärbung, würfelförmiger Zerfall des Holzes	chem. Mittel in Verbindung mit baul. Maßnahmen
Weißer Porenschwamm	vorwiegend Nadelholz, Keller, Alt- und Neubauten	25–28 °C, 40–50% Holzfeuchte, Stillstand bei 37 °C	Destruktionsfäule, rotbraune Verfärbung, Zerstörung	bauliche Maßnahmen
Kellerschwamm	vorwiegend Nadelholz, feuchte Neu- und Altbauten	22–26 °C, etwa 55% Holzfeuchte, Zuwachsstillstand bei 34 °C	Destruktionsfäule, rotbraune Verfärbung, Holzzerstörung	bauliche Maßnahmen, Austrocknung
Hausbock	Nadelholz, verbautes Holz, Dachboden, Masten	–	ovale Fraßgänge, gefüllt mit lockerem Bohrmehl, Zerstörung von Splint- und Reifholz	Verwendung von Kern- oder Laubholz, Imprägnierung
Pochkäfer	alle Holzarten, verbautes Holz, Möbel, Kunstgegenstände	55% Luftfeuchte, 12–18 °C	enge und runde Fraßgänge, Zerstörung vor allem von Möbeln und Kunstgegenständen	Imprägnieren
Splintholz-Käfer	Splintholz von Laubbäumen	–	geschlängelte Fraßgänge in Faserrichtung, Fußböden, Möbel	Dämpfen, Imprägnieren
Termiten	fast sämtliche Holzarten, Kern und Splint	tropisches Klima	Holz wird innen zerstört, Oberfläche bleibt ganz	resistente Holzart, Imprägnieren

## Witterungseinfluß

Bei Sonneneinstrahlung wird die Holzoberfläche durch die UV-Strahlen bräunlich verfärbt und abgetragen. Schwerwiegender sind jedoch durch häufige Feuchtigkeitswechsel verursachte Schwind- und Quellsbewegungen. Langandauernde Feuchtigkeit begünstigt zudem das Pilzwachstum.

### Chemische Einflüsse

Holz ist gegenüber Säuren und Salzlösungen weitgehend resistent, Laugen führen bei hohen Temperaturen zu einer rascheren Holzzerstörung. Generell gilt, daß Holz im pH-Bereich von 2 ÷ 10 als beständig gegen chemische Einflüsse anzusehen ist, wobei sich die einzelnen Holzarten in Abhängigkeit von der Einwirkungsdauer und -temperatur unterscheiden.

### Hohe Temperaturen (Brandfall)

Holz ist bis rd. 150 °C thermisch beständig, oberhalb dieser Temperatur tritt eine chemische Zersetzung der Holzsubstanz unter Bildung von Holzkohle und brennbaren Gasen ein. Bei langanhaltender Erwärmung kann sich Holz bereits bei ca. 150 °C entzünden, bei rascher Erwärmung tritt eine Entzündung bei etwa 340–430 °C ein. Ab etwa 500 °C erfolgt eine verstärkte Bildung von Holzkohle, die gegen die weitere thermische Zersetzung des Holzininneren als Dämmschicht wirkt.

### 5.5.6.2 Natürliche Widerstandsfähigkeit des Holzes gegen Schadeinflüsse

Die einzelnen Holzarten besitzen eine mehr oder minder große natürliche Resistenz, die jedoch beträchtlich variiert. Eine hohe natürliche Resistenz des Kernholzes gegen Pilzbefall weisen die tropischen Harthölzer auf; europäische Hölzer (Eiche, Kiefer) besitzen eine mäßig hohe Resistenz. Die Lebensdauer von Holz hängt v.a. von den Umweltbedingungen ab. Unter freier Bewitterung schwankt die Lebensdauer unbehandelter Hölzer in Abhängigkeit von der Holzart und den Beanspruchungen zwischen einigen und über hundert Jahren. Ungünstig wirken sich wechselnde Feuchtigkeiten aus; ständig trockenes Holz erreicht eine sehr lange Lebensdauer.

### 5.5.6.3 Konstruktiver Holzschutz

Konstruktive Schutzmaßnahmen können wesentlich zur Vermeidung von Pilzbefall und von Witterungseinflüssen sowie zur Erhöhung der Feuerwiderstandsdauer beitragen, gegen holzerstörende Insekten sind konstruktive Maßnahmen unwirksam. Der Schutz gegen Pilzbefall und Witterungseinfluß beginnt mit der Auswahl einer resistenten Holzart.

Weitere Maßnahmen sind der Einbau von trockenem Holz (Feuchtigkeitsgehalt  $\leq 20$  M-%) und das Fernhalten bzw. die rasche Ableitung von Niederschlags- und Tauwasser, um Feuchtewechsel des Holzes zu verhindern. Dadurch wird auch übermäßiges Schwinden und Quellen vermieden.

### 5.5.6.4 Chemischer Holzschutz

Der chemische Holzschutz durch Holzschutzmittel dient zur Ergänzung baulicher Maßnahmen. Er ist dann notwendig, wenn die natürliche Resistenz des Holzes nicht ausreicht. Außerdem wird er bei der Sanierung von bereits befallenen Holz erforderlich.

Handelsübliche Holzschutzmittel sind Gemische verschiedener Wirk- und Zusatzstoffe (Netzmittel, Korrosionsschutzmittel, Farbstoffe etc.) mit oder ohne Lösungsmittel. Je nach der Schutzart werden an die Holzschutzmittel sehr vielfältige Anforderungen gestellt, die von einem Präparat jedoch nicht erfüllbar sind:

- Die Schutzmittel müssen gegenüber Holzschädlingen eine Giftwirkung besitzen, jedoch keine giftige Nebenwirkung für Verarbeiter und Nutzer aufweisen.
- Holzschutzmittel sollen die Entflammbarkeit des Holzes herabsetzen.
- Sie sollen durch Niederschlagswasser nicht ausgewaschen werden, möglichst nicht verdunsten und sich bei Atmosphäreneinwirkung chemisch nicht verändern.
- Die Schutzstoffe sollen das Holz nicht angreifen, d.h. seine Festigkeitseigenschaften nicht beeinträchtigen und auf angrenzende Baustoffe (Mauerwerk, Putz, Stahl) nicht korrosionsfördernd wirken.
- Die Schutzmittel sollen gut in das Holz eindringen, seine Oberfläche jedoch nicht verändern.

In der Bundesrepublik muß die Eignung aller Holzschutzmittel durch Versuche nachgewiesen werden. Geeignete Mittel erhalten ein Prüfzeichen des IfBt, aus dem Schutzart und Einbringverfahren hervorgehen (s. Tab. 5.5.6).

Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz eines Holzschutzmittels ist neben der Auswahl des Mittels ein geeignetes Einbringverfahren. Die Behandlung erfolgt grundsätzlich nach dem letzten Bearbeitungsgang der Holzbauteile, um eine optimale Schutzmittelaufnahme und -verteilung zu erzielen. Das angewandte Verfahren muß auf die Eigenschaften des Holzes und des Holzschutzmittels abgestimmt sein. Tab. 5.5.7 gibt einen Überblick über die wichtigsten Holzschutzverfahren. Auf die einzelnen Holzschutzmittel und Einbringverfahren soll hier nicht näher eingegangen werden (s. [4], [6], [7]).

Tab. 5.5.6 Kurzbezeichnung der Prüfprädikate von Holzschutzmitteln und ihre Bedeutung

Kurzbezeichnung	Wirksamkeit
P	wirksam gegen <b>P</b> ilze
Iv	<b>v</b> orbeugend gegen <b>I</b> nsekten
(Iv)	nur bei Tiefschutz gegen Insekten vorbeugend wirksam
Ib	wirksam zur <b>I</b> nsekten <b>b</b> ekämpfung
F	geeignet zum schwerentflammbar machen ( <b>F</b> euerschutz)
S	zum <b>S</b> treichen, <b>S</b> prühen oder Tauchen geeignet
W	geeignet für der <b>W</b> itterung ausgesetztes Holz

Tab. 5.5.7 Überblick über die wichtigsten Holzschutzverfahren nach [4]

	Verfahren	Aufwand	Ergebnis	Bestimmung der Einbringmenge <sup>1</sup>	Einsatzbereich
handwerkliche Verfahren	Streichen Spritzen Tauchen	sehr gering bis gering	meist Randschutz z. T. Tiefschutz	bedingt möglich	Vorbeugung Bekämpfung
	Spritztunnel	mäßig		möglich	Vorbeugung
	Trogtränkung Einstelltränkung Heiß-Kalt-Trogtränkung	mäßig	z. T. Randschutz meist Tiefschutz	bei trockenem Holz möglich bei nassem Holz bedingt möglich	
	Diffusionstränkung	gering bis mäßig	Tief- bis Vollschutz	bedingt möglich	
	Sonderverfahren für Gefahrenstellen		stellenweiser Tief- bis Vollschutz		
	Begasung Heißluft	gering bis groß	Abtötung	–	Bekämpfung <sup>2</sup>
größtechn. Verfahren	Vakuumtränkung	groß	meist Tiefschutz	möglich	Vorbeugung
	Kesseldrucktränkung	sehr groß	Tief- bis Vollschutz	erfolgt stets	
	Saftverdrängung	mäßig bis groß	Tief- bis Vollschutz	bedingt möglich	Vorbeugung

1 Bestimmungsmöglichkeit im praktischen Betrieb. Eine nachträgliche chemisch-analytische Bestimmung in speziell eingerichteten Laboren bleibt stets möglich.

2 keine vorbeugende Wirkung.

### 5.5.7 Verbindungen im Holzbau

Den Verbindungsmitteln kommt im Holzbau besondere Bedeutung zu, da Holz nicht wie Stahl geformt oder wie Beton in vielfältigen Formen gegossen werden kann. Holzbauteile müssen daher aus einzelnen Teilen mit Hilfe von Verbindungsmitteln zusammengesetzt werden [N 1 und N 2].

#### 5.5.7.1 Zimmermannsmäßige Verbindungen

Zimmermannsmäßige Verbindungen werden heute nur noch in geringem Maße verwendet, da sie den Holzquerschnitt schwächen und durch ihre schwierige Herstellung einen hohen Arbeitsaufwand erfordern. Man unterscheidet zwischen Versatz-, Zapf- und Blattverbindungen (s. Bild 5.5.19).

Versätze werden im Bauwesen bei Fachwerken, Dreiecksverbindungen sowie Sparren- und Kehlbalkendächern verwendet. Die Beanspruchbarkeit eines Versatzes ist in Abhängigkeit vom Neigungswinkel  $\alpha$ , der Versatztiefe  $t_v$  und der Vorholzlänge  $l_v$  nachzuweisen. Zapfverbindungen werden nur bei Druckgliedern wie Stützen, Diagonalstreben usw. verwendet. Durch eine Verblattung werden vorwiegend Stöße und Ecken von druckbeanspruchten Schwellen, Balken und Pfetten verbunden. Wenn Zugkräfte übertragen werden sollen, müssen zusätzliche Verbindungsmittel (z. B. Nägel) verwendet werden.

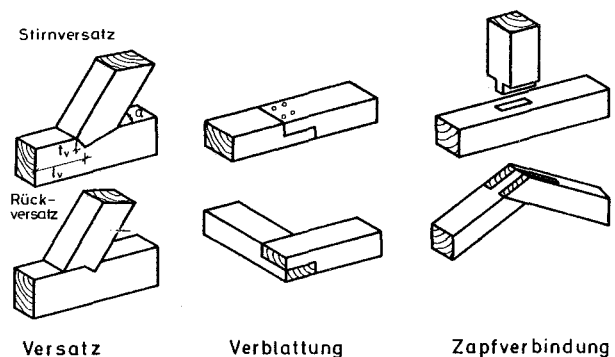


Bild. 5.5.19 Zimmermannsmäßige Holzverbindungen (Beispiele)

#### 5.5.7.2 Eingelassene und eingetriebene Verbindungsmittel

Dübel sind vorwiegend auf Lochleibung und Abscheren beanspruchte Verbindungsmittel aus Hartholz, Stahl, Temperguß oder Leichtmetall. Sie können in vorbereitete Vertiefungen eingelassen (Einlaßdübel) oder mit ihren krallenartigen Zaken in das Holz gepreßt werden (Einpreßdübel). Besondere Bedeutung kommt heute den einseitigen Dübelssystemen zu, die eine kraftschlüssige Verbindung von Holzbauteilen mit Stahlteilen ermöglichen [N 1].

### Bolzen und Stabdübel

Bolzen sind überwiegend auf Biegung beanspruchte Verbindungsmittel, die in vorgebohrte Löcher mit geringem Lochspiel (1 mm) eingelassen werden. Sie ergeben eine relativ nachgiebige Verbindung, da aufgrund des Lochspiels bis zur Kraftübertragung Verschiebungen möglich sind. Das Schwinden und Kriechen des Holzes verursacht eine Abnahme der Klemmwirkung. Bolzen dürfen daher für Dauerbauten nur dann verwendet werden, wenn durch Paßbohrung bzw. Verfüllen des Zwischenraums zwischen Schaft und Holzteil Verschiebungen verhindert werden.

Stabdübel sind Stahl- oder Hartholzstifte mit glattem oder gerilltem Schaft, die in vorgebohrte Löcher eingetrieben werden. Sie werden bevorzugt für die Verbindungen bei Brettschichtholz verwendet.

### Schrauben

werden in vorgebohrte Löcher eingedreht. Sie sind vorwiegend für die Befestigung von Platten, Tafeln und Decken auf Vollholz einsetzbar, wobei die Schrauben in Schafrichtung und senkrecht dazu beanspruchbar sind.

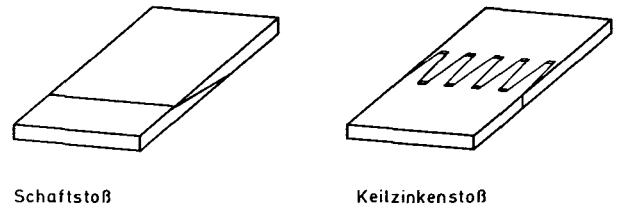
### Nägeln

sind bei scherbeanspruchten Holzverbindungen einsetzbar, können jedoch nur bedingt auf Zug belastet werden. Sie werden hauptsächlich ohne Vorbohrung in das Holz eingetrieben. Um ein Splittern des Holzes zu vermeiden, sind beim Nageln in Abhängigkeit vom Nageldurchmesser bestimmte Abstände und Einschlagtiefen einzuhalten. Bei leicht spaltendem Holz und großen Nageldurchmessern sind Vorbohrungen zu empfehlen.

Große Bedeutung haben heute Spezialverbindungen wie Stahlblech-Nagelverbindungen, Loch- und Nagelplatten. Bei einer Stahlblech-Nagelverbindung werden dünne Stahlbleche zusammen mit den Holzteilen vorgebohrt. In die so vorbereiteten Löcher werden die Nägel eingetrieben. Lochplatten weisen bereits vorgebohrte oder gestanzte Löcher auf. Nagelplatten bestehen aus dünnem Stahlblech mit einseitigen nagel- oder zackenförmigen Ausstanzungen. Sie müssen mit Pressen in das Holz eingetrieben werden, manuelles Nageln ist nicht zulässig. Nagelplatten werden bei Fachwerkknoten, Bindern und bei stumpfen Holzstößen verwendet.

### 5.5.7.3 Leimverbindungen

Leimverbindungen sind praktisch unverschiebbliche, flächenhafte Holzverbindungen, die vor allem Scherkräfte übertragen. Tragende Verbindungen können nur mit trockenem Holz und gehobelter Oberfläche unter Preßdruck hergestellt werden. Es sind witterungs- und feuchtigkeitsbeständige Kunstharzleime (Resorcin- oder Harnstoffharzleime) zu verwenden, deren Eignung nachgewiesen sein muß. Leimverbindungen (s. Bild 5.5.20) werden vorwiegend als Längsverleimung, bei Brettschichtholz und Stegträgern oder als Stoßverbindung von Einzelbrettern ausgeführt (Keilzinkenstoß, seltener Schäftstoß).



Schaftstoß

Keilzinkenstoß

Bild 5.5.20 Leimverbindungen

## 5.5.8 Normen, Richtlinien

- [N 1] DIN 1052: Holzbauwerke, Berechnung und Ausführung, T. 1; 10.69. Bestimmung für Dübelverbindungen besonderer Bauart, T. 2; 10.69. Holztafeln, Berechnung und Ausführung, T. 3; E 02.79.
- [N 2] DIN 1074: Holzbrücken, Berechnung und Ausführung, 8.41.
- [N 3] DIN 4070: Nadelholz, Querschnittsmaße und statische Werte. Dimensions- und Listenware; T. 1; 10.63 und T. 2; 1.58.
- [N 4] DIN 4074: Bauholz für Holzbauteile, Gütebedingungen; 12.58.
- [N 5] DIN 52175: Holzschutz, Begriff, Grundlagen; 01.75.
- [N 6] DIN 52180: Prüfung von Holz, Probenahme; 11.77.
- [N 7] DIN 52181: Bestimmung der Wuchseigenschaften von Nadelholz; 8.75.
- [N 8] DIN 52182: Prüfung von Holz, Bestimmung der Rohdichte; 9.76.
- [N 9] DIN 52183: Prüfung von Holz, Bestimmung des Feuchtigkeitsgehalts; 11.77.
- [N 10] DIN 52184: Prüfung von Holz, Bestimmung der Quellung und Schwindung; 5.79.
- [N 11] DIN 52185: Prüfung von Holz, Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser; 9.76.
- [N 12] DIN 52186: Prüfung von Holz, Biegeversuch; 6.78.
- [N 13] DIN 52187: Prüfung von Holz, Bestimmung der Scherfestigkeit in Faserrichtung; 5.79.
- [N 14] DIN 52188: Prüfung von Holz, Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zur Faser; 5.79.
- [N 15] DIN 52189: Prüfung von Holz, Schlagbiegeversuch, Bestimmung der Bruchschlagarbeit; 12.81.
- [N 16] DIN 52192: Prüfung von Holz, Druckversuch quer zur Faserrichtung; 5.79.
- [N 17] DIN 68252: Begriffe für Schnittholz; Form und Maße; 1.78.
- [N 18] DIN 68364: Kennwerte von Holzarten; Festigkeit, Elastizität, Resistenz; 11.79.
- [N 19] DIN 68365: Bauholz für Zimmerarbeiten, Gütebedingungen; 11.57.
- [N 20] DIN 68705: T. 2: Sperrholz für allgemeine Zwecke, Entwurf, 07.81. T. 3: Bau-Furniersperrholz; 12.81. T. 4: Bau-Stabsperrholz, Bau-Stäbchensperrholz; 12.81.
- [N 21] DIN 68750: Holzfaserplatten; poröse und harte Holzfaserplatten, Gütebedingungen; 04.58.
- [N 22] DIN 68751: Kunststoffbeschichtete dekorative Holzfaserplatten; Begriff, Anforderungen; 3.76.

- [N 23] DIN 68 752: Bitumen-Holzfaserplatten; Gütebedingungen; 12.74.
- [N 24] DIN 68 753: Begriffe für Holzfaserplatten; 01.76.
- [N 25] DIN 68 754: Harte und mittelharte Holzfaserplatten für das Bauwesen; 02.76.
- [N 26] DIN 68 762: Spanplatten, Flachpreßplatten für das Bauwesen; 07.80.
- [N 27] DIN 68 763: Spanplatten, Flachpreßplatten für das Bauwesen; 07.80.
- [N 28] DIN 68 764: Spanplatten, Strangpreßplatten für das Bauwesen; 09.73.
- [N 29] DIN 68 800: T. 1: Holzschutz im Hochbau, Allgemeines; 5.75. T. 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen; 5.74. T. 3: Vorbeugender chemischer Schutz von Vollholz; 5.81. T. 4: Bekämpfungsmaßnahmen gegen Pilz- und Insektenbefall; 5.74. T. 5: Vorbeugender chemischer Schutz von Holzwerkstoffen; 5.78.

## 5.5.9 Literatur

- [1] Backe, H.: Werkstoffkunde für die Bauindustrie. VEB Verlag, 1972.
- [2] Gehri, E.: Baustoff Holz – Erkenntnisse und Entwicklungen im technologischen Bereich und in den Verbindungen. IVBH-Kongreß Wien, 1980.
- [3] Holzbau-Atlas. Institut für internationale Architektur – Dokumentation. München, 1978.
- [4] Holzbau-Taschenbuch. Wilhelm Ernst & Sohn, 1974.
- [5] Knodel, H.: Holzschutz am Bau. Bauverlag, 1963.
- [6] Knöfel, D.: Stichwort: Holzschutz. 2. Aufl., Bauverlag, 1982.
- [7] Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. 2 Bände. Springer-Verlag, 1955.
- [8] Reinhardt, H.-W.: Ingenieurbaustoffe. Wilhelm Ernst & Sohn, 1973.
- [9] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile. Band 4: Holz, Kunststoffe. Bauverlag, 1973.

## 5.6 Mineralische Bindemittel

### 5.6.1 Einleitung

Die wesentlichen anorganischen, mineralischen Bindemittel Zement, Kalk, Gips und andere sind pulverförmige Stoffe, die, mit Wasser angemacht, erhärten. Sie haben die Aufgabe, Gemenge von mineralischen Stoffen (z. B. Sand) zu einem Verbundbaustoff fest zu verkitten (z. B. Mauer- mörtel).

In Tab. 5.6.1 sind die wesentlichen Bindemittel in einer Übersicht zusammengestellt. Sie unterscheiden sich nach ihren chemisch-mineralogischen Grundsubstanzen und nach dem Erhärtungsverhalten, woraus sich die Gebrauchseigenschaften des Bindemittels und dessen Anwendungsgebiete ergeben. Neben diesen Bindemitteltypen entste-

hen weitere durch Mischung von Bindemitteln, hydraulischen Stoffen, inerten Gesteinsmehlen u.ä. Beispiele: Mischbinder nach DIN 4207, Putz- und Mauerbinder nach DIN 18 550. Sie werden hier nicht behandelt, s. [5]. Weiterhin wird auch der Bindemitteltyp auf Calciumaluminatbasis nicht besprochen, zu dem der heute nicht mehr zugelassene Tonerdeschmelzzement gehört. Der Magnesiumbinder wird hier nicht behandelt.

## 5.6.2 Die Zemente

### 5.6.2.1 Arten und Bestandteile der Zemente

Die im Bauwesen hauptsächlich verwandten Zemente sind nach DIN 1164 [N 1] genormt. Zu den Normzementen gehören: Portlandzement PZ, Eisenportlandzement EPZ, Hochofenzement HOZ und Traßzement TrZ. Daneben gibt es noch einige bauaufsichtlich zugelassene Zemente und Zemente für Sonderaufgaben (s. [1] und [2]).

Die Hauptbestandteile der Normzemente sind Portlandzementklinker, Hüttensand und Traß. Tab. 5.6.2 zeigt die Zusammensetzung der Normzemente aus diesen Bestandteilen. Tab. 5.6.3 enthält die chemische Zusammensetzung der in der Bundesrepublik hergestellten Zemente (s. auch [1]).

Der Portlandzementklinker wird aus natürlichen Rohstoffen durch Aufbereitung und Brennen im Zementofen bis zum Sintern (rd. 1450 °C, teilweises Schmelzen ohne Schmelzfluß) hergestellt. Folgende Rohstoffe werden benötigt:

Kalkstein, Kreide	CaCO <sub>3</sub>
Ton, Feldspat	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O und K <sub>2</sub> O
Quarzsand	SiO <sub>2</sub>

Bei der Sinterung reagieren diese Oxide miteinander, und es entstehen die sog. Klinkerminerale oder -phasen. Der körnige Portlandzementklinker enthält sämtliche Klinkerminerale. Erst durch Feinmahlen des PZ-Klinkers entsteht Portlandzement. Bezgl. Grundlagen der Zementchemie, s. [1], [2] und [3].

Der Hüttensand ist ein Abfallprodukt der Roheisenverhüttung. Flüssige Hochofenschlacke wird durch Wasser rasch abgekühlt und erstarrt dabei glasig zu Körnern, die granuliert werden. Hüttensand und Portlandzementklinker werden bei EPZ und HOZ gemeinsam feingemahlen. EPZ und HOZ werden auch als Hüttenzemente bezeichnet. Der Hüttensand besteht aus CaO, Kieselsäure SiO<sub>2</sub>, Tonerde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und MgO. Er ist ein latent hydraulischer Stoff, der – erst durch Kalkhydrat angeregt – zu erhärten vermag. Auf Mischzementen, die durch gemeinsames Vermahlen von PZ-Klinkern mit Hütten Schlackenmehl oder Elektrofilterasche oder Silicastaub hergestellt werden können, wird nicht eingegangen.

Traß [N 2] ist i. a. eine vulkanische Asche mit latent-hydraulischen Eigenschaften, die überwiegend aus glasig erstarrter Kieselsäure besteht. Durch Mischung mit PZ-Klinker bzw. mit PZ-Klinker und Hüttensand erhält man Traß- bzw. Traßhochofenzement. Ölschieferzement ist ein Gemisch aus gebranntem Ölschiefer, der hydraulisch wirkt, und PZ-Klinker.



Tab. 5.6.1 Übersicht über die wesentlichen anorganischen, mineralischen Bindemittel

Bindemitteltyp	Grundstoffe	Erhärtungsverhalten	Bindemittelart	Einsatzgebiete
Calciumsilicat-bindemittel (Zemente)	Kalkstein $\text{CaCO}_3$ Kieselsäure $\text{SiO}_2$ Tonerde $\text{Al}_2\text{O}_3$ Eisenoxid $\text{Fe}_2\text{O}_3$	an Luft oder unter Wasser – hydraulische BM	Zemente nach DIN 1164 u. a. Portland-Z Eisenportland-Z Hochofen-Z Traßzement u. a.	Betonbau, Mauermörtel, Putz, Estrich
Kalkbindemittel (Baukalk)	Kalkstein $\text{CaCO}_3$ u. a.	an Luft (Luftkalk) nichthydraul. BM	Weißkalk, Dolomitkalk, Karbidkalk n. DIN 1060	Putz- und Mauermörtel
	$\text{CaCO}_3$ $\text{SiO}_2$ $\text{Al}_2\text{O}_3$	nach Vorlagerung an Luft auch unter Wasser	Wasserkalk, hydraulischer und hochhydraulischer Kalk n. DIN 1060	Putz- und Mauermörtel höherer Festigkeit und Wasserfestigkeit
Calciumsulfat-bindemittel (Baugipse)	$\text{CaSO}_4$	an Luft	Stuckgips, Putzgips, Estrichgips, Anhydritbinder	Putze, Stuck-, Rabitzarbeiten, Estriche
Magnesium-bindemittel	Magnesit $\text{Mg CO}_3$ Dolomit $\text{CaCO}_3 \cdot \text{Mg CO}_3$	an Luft mit $\text{MgCl}_2$	Magnesiumbinder	Steinholzfußböden

Tab. 5.6.2 Bestandteile der Normzemente<sup>1</sup>

Bez.	PZ-Klinker	Hüttensand	Traß
<u>PZ</u>	96	–	–
<u>EPZ</u>	65	bis 35	–
<u>HOZ</u>	15–64	85–36	–
<u>TrZ</u>	60–80	–	40–20

<sup>1</sup> in M.-%, ohne  $\text{CaSO}_4$ -Anteil (Gips)

Bei allen Zementen wird Gipsstein oder Anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ ) zugemahlen, um ein zu rasches Erstarren des Zement-Wasser-Gemisches (Zementleim) zu verhindern (s. Abschn. Hydratation).

Sämtliche Gebrauchseigenschaften des erhärteten Zementleims, Zementstein genannt, werden von den Klinkerphasen und deren Reaktionen mit Wasser bestimmt. Tab. 5.6.4 gibt einen Überblick über die Klinkerphasen im Portlandzementklinker.

#### 5.6.2.2 Hydratation

##### Der chemisch-physikalische Vorgang

Bei der ersten Berührung der Zementkörner mit Wasser setzen Reaktionen ein, die unter dem Begriff Hydratation zusammengefaßt werden [1], [2]. Die Klinkerminerale werden in wasserhaltige Verbindungen, als Hydratphasen bezeichnet, umgewandelt. Die Reaktionsgeschwindigkeiten der einzelnen Klinkerphasen sind, wie Tab. 5.6.5 zeigt, sehr unterschiedlich.

Tab. 5.6.3 Chemische Zusammensetzung der Zemente\*\*\*

Bestandteil	Normzemente				bauaufs. zugel. Zemente		
	PZ	EPZ	HOZ	TrZ	Traßhochofenzement** 50/15/35    25/25/50		Ölschieferzement
CaO	64	59	53	51	47	43	55
$\text{SiO}_2$	20	22	25	21	24	26	20
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2^*$	5	7	9	7	9	11	6
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2,5	2	1,6	3	2,8	2	4
$\text{Mn}_2\text{O}_3$	0,1	0,3	0,5	0,2	0,3	0,2	0,1
MgO	1,5	2,5	3,5	1,5	2,4	1,5	2
$\text{SO}_3$	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	3,5	3

\*  $\text{TiO}_2$ -Gehalt rd. 0,2%

\*\* Verhältnis PZ-Klinker/Traß/Hüttensand

\*\*\* in M.-% und i. M.

Tab. 5.6.4 Phasenanteile im PZ-Klinker

Klinkerphase	Bruttoformel	Kurz- bez.	mittl. Ge- halt in M.-%
Tricalciumsilicat	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	60
Dicalciumsilicat	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	15
Calcium- aluminatferrit	$2\text{CaO} \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3; \text{Fe}_2\text{O}_3)$	$\text{C}_2(\text{A}, \text{F})$	8
Tricalcium- aluminat	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	11
freies CaO	CaO	—	1
freies MgO	MgO	—	1

Aus bautechnischer Sicht gesehen, umfaßt die Hydratation zwei Abschnitte, nämlich das Erstarren und das Erhärten des Zementsteines. Während der Phase des Erstarrens wandelt sich der Zementleim graduell zu einem quasi-festen Stoff, der schließlich zum Festkörper aushärtet. Innerhalb der Phase des Erstarrens liegen die Vorgänge der Herstellung, Einbringung und Verdichtung des Betons etc. Erstarren und Erhärten sind gleichartige Prozesse, die fließend ineinander übergehen.

Wie in Bild 5.6.1 dargestellt ist, lassen sich drei aufeinander folgende Hydratationsstufen unterscheiden. Das Tricalciumaluminat  $\text{C}_3\text{A}$  reagiert als erstes sehr rasch mit Wasser und würde ein sofortiges Ansteifen des Leimes hervorrufen. Es ist die Aufgabe des Gipszusatzes, dies zu verhindern, indem das Calciumsulfat  $\text{CaSO}_4$  das  $\text{C}_3\text{A}$  in die wasserreichen Verbindungen  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$  (Trisulfat, Ettringit genannt) bzw.  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  (Monosulfat) einbaut. Das Trisulfat kristallisiert in langen Nadeln von der Oberfläche des Zementkornes aus und führt zum ersten Ansteifen. Die Bildung des Trisulfates ist mit einer großen Volumenzunahme verbunden, die aber noch im plastischen Zustand des Zementleimes abläuft und deshalb keinen Gefügeschaden verursacht.

Für die Entstehung der Festigkeit des Zementsteins sind das rasch reagierende Tricalciumsilicat und das langsamer reagierende Dicalciumsilicat allein von Bedeutung. Diese

Klinkerphasen bilden in der II. Stufe zunächst feine und lange Calciumsilicathydratnadeln (CSH-Phasen), die den wassergefüllten Raum überbrücken und sich ineinander verfilzen. In der III. Stufe bilden sich überwiegend feine, kurze Nadeln und Fasern. Der Raum wird erfüllt und verdichtet. Das  $\text{C}_3\text{S}$  und das  $\text{C}_2\text{S}$  spalten große Mengen von Kalkhydrat  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ab, das zwar selbst zur Festigkeit keinen Beitrag leistet, aber zu einer hohen Basizität ( $\text{pH} > 12,6$ ) des Porenwassers führt und so den Rostschutz eingebetteten Stahles sichert. Die Formen der Hydratationsprodukte sind vielfältig: Die CSH-Phasen bestehen aus Nadeln, Leisten, ein- und mehrschichtigen Folien. Das Kalkhydrat kristallisiert hexagonal-plattig aus.

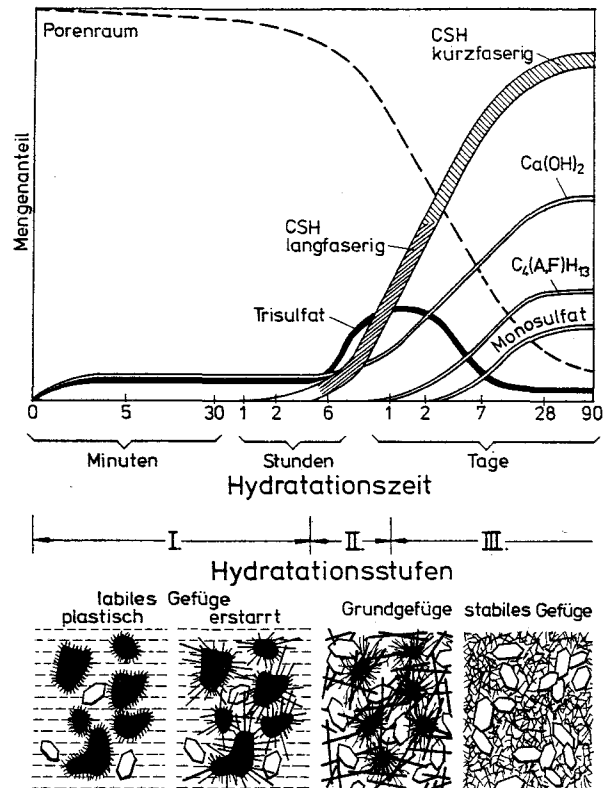


Bild 5.6.1 Entwicklung der Hydratphasen und des Gefüges (schematisch; nach Richartz, s. [1])

Tab. 5.6.5 Verhalten der Klinkerphasen bei der Hydratation

Klinker- phase	Hydratationsprodukt	Erhärten	Festigkeit		Hydrat. Wärme	bautechnisch maßgebend für
			am Anfang	am Ende		
$\text{C}_3\text{S}$	CSH-Phase $m \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ Abspalten von $\text{Ca}(\text{OH})_2$	schnell	rasch und hoch	hoch	rasch und hoch	eine hohe Anfangs- festigkeit
$\text{C}_2\text{S}$	wie $\text{C}_3\text{S}$	langsam	niedrig	hoch	mäßig	eine mäßige Anfangs- festigkeit
$\text{C}_3\text{A}$	mit $\text{CaSO}_4$ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ und $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	anfänglich schnell	niedrig	niedrig	sehr hoch	Erstarrungs- beschleunigung
$\text{C}_2(\text{A}, \text{F})$	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$	langsam	niedrig	niedrig	hoch	unbedeutend

### Erhärungsverlauf und -bedingungen

Die Zementerhärtung ist ein zeitabhängiger Prozeß, der mit zunehmendem Alter zum Stillstand strebt, da sich mit zunehmender Dicke der CSH-Schicht um das Zementkorn der Diffusionsweg der Wassermoleküle ins Korninnere verlängert. Darüber hinaus spielen die inneren (im Zementstein) und äußeren (Klima um das Betonbauteil) Erhärungsbedingungen eine große Rolle. Gradmesser des Erhärungsfortschrittes und -zustandes ist der Hydratationsgrad

$$m = \frac{\text{Masse des hydratisierten Zements}}{\text{Zementausgangsmasse}}$$

der zu Beginn 0, nach dem Erstarrungsende < 12 h rd. 0,15 und bei vollständiger Erhärtung 1 beträgt. Der Hydratationsgrad ist eine Funktion von Zeit, Feuchte, Temperatur, chem. Zusammensetzung, Mahlfineinheit u. a. m.

Bild 5.6.2 zeigt die zeitliche Entwicklung des Hydratationsgrads der Klinkerminerale bei optimalen Erhärungsbedingungen (20 °C/100% r. F.) und der Festigkeit. Hydratationsgrad und Festigkeit besitzen affine Zeitverläufe, insbesondere für die Festigkeitsbildner  $C_3S$  und  $C_2S$ , und sind eben nur unterschiedliche Informationen über die Erhärtung. Mit den Masseanteilen von Tab. 5.6.4 erkennen wir, wie sich die Minerale an der Zementfestigkeit in etwa beteiligen:  $C_3A$  und  $C_4AF$  leisten nichts. Die Erhärungsverläufe der Normzemente werden später besprochen.

Die Reaktionen laufen um so rascher ab, je mehr benetzbare Oberfläche dem Anmachwasser angeboten wird (Staubzucker wird rascher gelöst als Würfelzucker!). Damit ist der

Einfluß der Mahlfineinheit umrissen: fein gemahlene Zemente erhärten wegen der größeren spezifischen Oberfläche schneller als grobe.

Die Erhärtung ist außerdem von inneren und äußeren Erhärungsbedingungen abhängig. Dabei ist zu unterscheiden nach

#### 1. inneren Erhärungsbedingungen:

- eine ausreichende Anmachwassermenge zur Benetzung und Hydratisierung ist erforderlich

#### 2. äußere Erhärungsbedingungen:

- eine möglichst hohe Luftfeuchte; Schutz vor zu früher Austrocknung, ja sogar Feuchtezufuhr mag erforderlich werden (Nässen),
- eine Temperatur von > 5° über eine gewisse Zeit bei Beginn der Erhärtung ist erforderlich. Die Erhärtung kommt bei – 10 °C völlig zum Stillstand.
- ein Lagerungsklima von + 20 °C/100% r. F. ist optimal.

Die Erhärtung ist ein thermisch aktivierbarer Prozeß: hohe Temperaturen beschleunigen (z. B. Warmbehandlung, Dampfhärtung), tiefe Temperaturen verlangsamen. Der Einfluß der Temperatur auf die Erhärtung bzw. Festigkeit, bei ansonsten ausreichender Feuchte, kann über den Reifegrad nach Saul ausgedrückt werden, der in Abschnitt 5.7 erläutert wird.

In der Praxis kann eine vollständige Erhärtung nur bei dauernd feucht gelagerten Bauteilen (z. B. im Wasserbau) oder im Inneren dicker Körper erreicht werden.

### Hydrationswärme

Die Zementerhärtung ist ein exothermer Vorgang, bei dem die Hydrationswärme freigesetzt wird. Die Hydrationswärmeentwicklung ist baupraktisch von großer Bedeutung und kann je nach Praxissituation entweder mit Vor- oder mit Nachteilen verbunden sein. Die Hydrationswärme ist für das Betonieren im Winter von Vorteil, im Sommer hingegen von Nachteil. Bei massigen Bauteilen führt die Aufheizung des Betons zu Spannungen und häufig zu Rissen. Die Wärmemenge und die Geschwindigkeit ihres Freisetzens ist für die einzelnen Klinkerphasen sehr unterschiedlich, wie die Tab. 5.6.5 und 5.6.6 sowie Bild 5.6.3 zeigen. Vor allem das Tricalciumaluminat entwickelt eine große Wärme in kurzer Zeit. Aus der Kenntnis des Verhaltens der Klinkerphasen ist es möglich, Zemente mit geringer Wärmetönung gezielt herzustellen.

Zemente für massige Bauteile dürfen nur wenig bis kein Tricalciumaluminat enthalten und auch nur einen mäßigen Tricalciumsilicatgehalt aufweisen. Mit zunehmender Beigabe von Traß und/oder Hüttensand wird die Hydrationswärme kleiner und langsamer freigesetzt. Wie Tab. 5.6.6 zeigt, setzen die Portlandzemente größere Wärmemengen frei als die aluminatarmen Hütten- und Traßzemente.

Von großem Einfluß auf die Geschwindigkeit der Wärmeentwicklung, jedoch nicht auf die Gesamtmenge der Wärme, ist die Mahlfineinheit des Zements. Je feiner gemahlen der Zement ist, um so rascher laufen die Erhärungsreaktionen ab und um so rascher wird die Hydrationswärme freigesetzt. Die Mahlfineinheit stellt neben der chemischen Zusammensetzung des Zements eine weitere Regelgröße zur

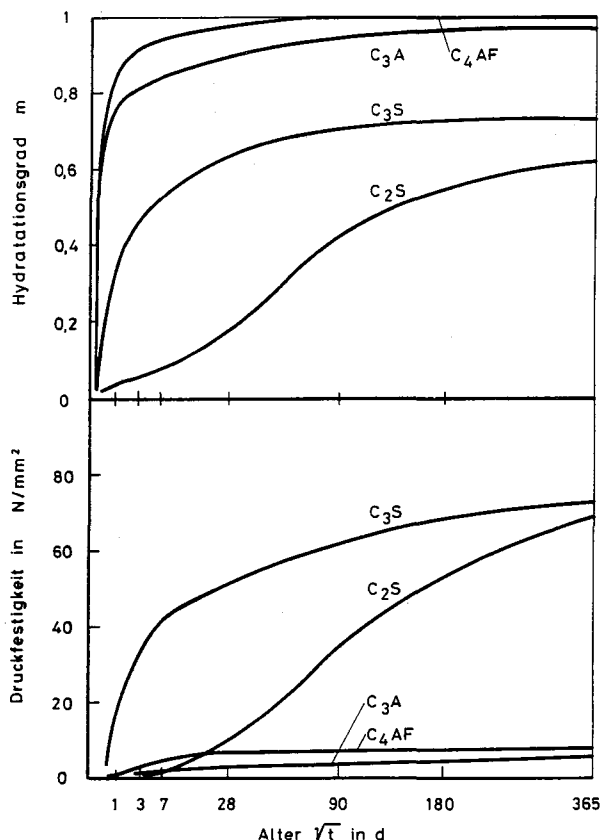


Bild 5.6.2 Hydrationsgrad und Festigkeit der Klinkerphasen abhängig von der Zeit bei optimalen Erhärungsbedingungen

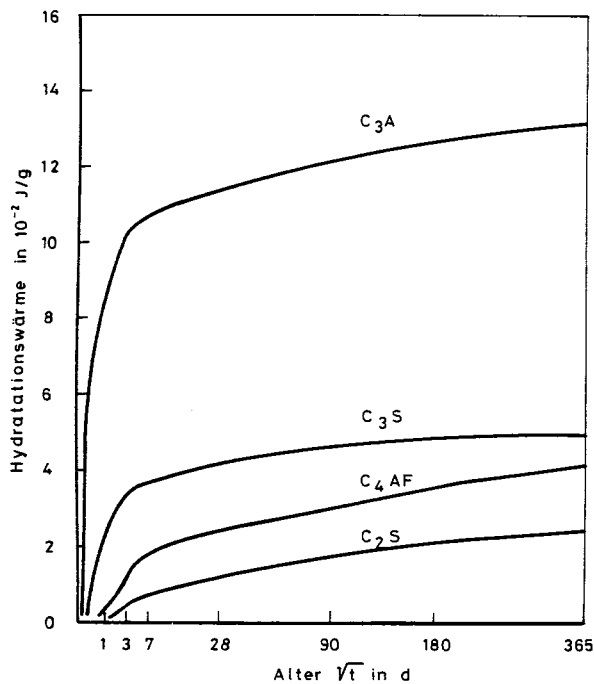


Bild 5.6.3 Wärmeentwicklung der Klinkerphasen

Beeinflussung der Wärmefreisetzung und der Festigkeitsentwicklung am Beginn der Erhärtung dar. Eine hohe Anfangsfestigkeit ist stets mit einer hohen Wärmetönung verbunden.

Tab. 5.6.6 Hydrationswärme der Klinkerphasen und Normzemente

Klinkerphase	Hydrat. Wärme	Zementart	Hydrat. Wärme
	J/g		J/g
C <sub>3</sub> S	500	PZ	375 bis 520
C <sub>2</sub> S	250	EPZ u. HOZ	355 bis 440
C <sub>3</sub> A	1330	TrZ	310 bis 420
C <sub>4</sub> AF	420	Tr HOZ	220 bis 280

### 5.6.2.3 Struktur und Porosität des Zementsteins

#### Wasserzementwert

Sämtliche Gebrauchseigenschaften des Zementsteins werden über dessen Struktur und Porosität gesteuert. Unter Struktur verstehen wir die innere Ordnung der Hydrationsprodukte und der sie trennenden Hohlräume, die Poren. Die Porosität erfaßt neben dem mengenmäßigen Anteil der Poren am Gesamtstoffraum auch deren Verteilung nach der Porengröße und im Raum. Struktur und Porosität werden i. w. vom Verhältnis der Anmachwassermenge  $W$  in kg zur Zementmenge  $Z$  in kg beeinflusst. Dieses Verhältnis  $W/Z = w$  wird Wasserzementwert genannt. Der Wasserzementwert stellt die wesentlichste Steuergröße in der Technologie der Mörtel und Betone dar.

Diese Feststellung gilt nicht nur für die Gebrauchseigenschaften im erhärteten Zustand, sondern auch für den frischen Zustand des Zementleims, des Frischmörtels und des Frischbetons. Die Anmachwassermenge bestimmt die Zähigkeit des frischen Gemisches und damit dessen Verarbeitbarkeit auf der Baustelle. Bereits an dieser Stelle soll auf das »Dilemma« der Betontechnologie hingewiesen werden, das in den Auswirkungen des Anmachwassers begründet ist: Eine große Anmachwassermenge ermöglicht ein leichtes und kostengünstiges Verarbeiten des Betons, wirkt sich jedoch auf Festigkeit und Dauerhaftigkeit ungünstig aus bzw. umgekehrt.

Von der Anmachwassermenge  $W$  kann nur ein Anteil von rd. 25% des Zementgewichts chemisch fest in den Hydrationsprodukten gebunden werden. Um eine möglichst vollständige Hydratation zu erzielen und auch aus Gründen der Verarbeitbarkeit des Frischmörtels oder -betons ist stets eine größere Anmachwassermenge erforderlich: erf. min  $W/Z \approx 0,40$ .

Wie sich im Zementleim Wasser und Zement unmittelbar nach dem Mischen stoffraummäßig beteiligen und welche Verarbeitbarkeit des Gemisches entsteht, zeigt Bild 5.6.4. Die Verarbeitbarkeit wird dabei durch den Zähigkeitsbegriff »Konsistenz« beschrieben, der später noch erläutert werden wird. Die Konsistenz des Zementleims wird vom  $W/Z$ -Wert bestimmt. Darüber hinaus sind die mengenmäßigen Anteile der Klinkerminerale und die Mahlfeinheit von Einfluß: feingemahlene Zemente ergeben steife Gemische, grobe Zemente neigen zum Absetzen (Sedimentation oder Bluten). Wir erhalten die Anteile des Wassers  $V_w$  und des Zements  $V_z$  am Gesamtvolumen  $V_L$  des Zementleims über eine Stoffraumrechnung:

$$\text{ges } V_L = V_w + V_z \quad (1)$$

$$V_w = \frac{W}{\rho_w}; \rho_w = 1,0 \text{ g/cm}^3 \text{ Dichte des Wassers}$$

$$V_z = \frac{Z}{\rho_z}; \rho_z \approx 3,1 \text{ g/cm}^3 \text{ Dichte des Zements}$$

$$w = \frac{W}{Z}$$

Damit ist anteilig:

$$\frac{V_z}{\text{ges } V_L} = \frac{1}{1 + w\rho_z} \text{ Anteil des Zements} \quad (2)$$

$$\frac{V_w}{\text{ges } V_L} = \frac{w\rho_w}{1 + w\rho_z} \text{ Anteil des Wassers} \quad (3)$$

Wir erkennen, daß im bautechnischen Bereich des  $W/Z$ -Wertes der Wasseranteil den Zementanteil übertrifft.

#### Struktur

Im Zementleim ist zunächst jedes Zementkorn von einer Wasserhülle umschlossen. In diese Wasserhülle hinein wachsen, ausgehend von der Kornoberfläche, die Hydrationsprodukte. Die Hydrationsprodukte bilden das Zementgel, das einen hochporösen Stoff darstellt und strukturell gesehen ein Filzwerk submikroskopischer Kristalle,

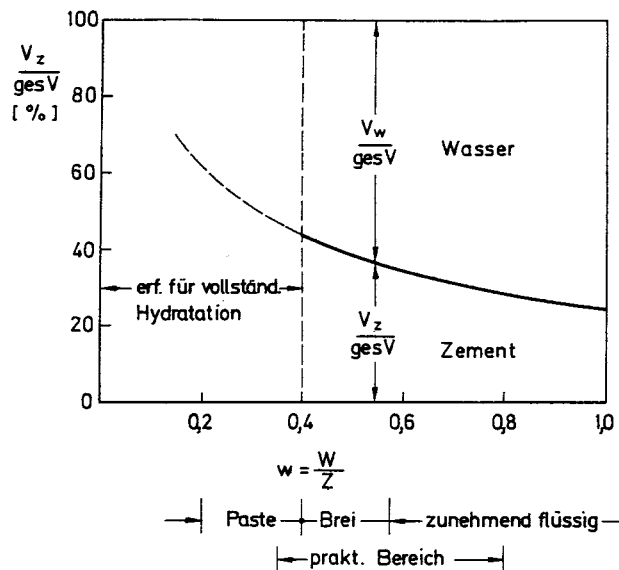


Bild 5.6.4 Raumanteile im Zementleim und Konsistenz

Gelpartikel, ist. Das Zementgel enthält, ohne scharfe Trennlinie, zwei Hohlraumsysteme:

- Gelporenraum**  
Er besteht aus den Gelporen, deren Größe etwa der Gelpartikelgröße entspricht.
- Kapillarporenraum**  
Er besteht aus den Kapillarporen, die um mehrere Zehnerpotenzen größer als die Gelporen sind. Der Kapillarporenraum nimmt mit steigendem W/Z-Wert zu.

Die Hydratation führt zu einer starken Strukturverfeinerung, die durch Vergleiche der Partikelgrößen sowie der inneren oder spezifischen Oberflächen vor und nach dem Erhärten beleuchtet werden kann. Der nichthydratisierte Zement weist pro g z. B. auf ( $1 \text{ \AA} = 10^{-7} \text{ mm}$ ):

mittlere Korngröße	$d_{mz}$	$\approx 0,010 \text{ mm}$
spezifische Oberfläche	$O_z$	$\approx 2000 \text{ cm}^2/\text{g}$
Kornanzahl mit $d_{mz}$	$n_z$	$\approx 700 \text{ Mill.} = 700 \cdot 10^6 \text{ Stück}$

Nach vollständiger Hydratation erhalten wir vereinfacht:

mittlere Korngröße der Gelpartikel	$d_{mG}$	$\approx 0,000015 \text{ mm} = \frac{1,5}{1000} d_{mz}$ $\triangleq 150 \text{ \AA}$
spezifische Oberfläche	$O_G$	$\approx 200 \text{ m}^2/\text{g} = 1000 \cdot O_z$
Gelpartikelzahl	$n_G$	$\approx 200 \cdot 10^{12} \text{ Stück}$
mittlerer Gelporendurchmesser	$d_{pGm}$	$\approx d_{mG}$
mittlerer Kapillarporendurchmesser	$d_{pkm}$	$\approx 1000 d_{mG}$

Aus der kolloidalen Teilchengröße und der riesigen spezifischen Oberfläche können wir ableiten, daß der Zusammenhalt des Zementsteins, ausdrückbar als Festigkeit, weniger durch chemische Bindungen der Gelpartikel untereinander, sondern vielmehr durch elektrostatische Anziehungskräfte, als van-der-Waals-Kräfte bezeichnet, bewirkt wird [6]. Eine schematische Vorstellung über Grobstruktur des Zementsteins vermittelt Bild 5.6.5. Die Wirkung des W/Z-Wertes auf die Struktur wird schematisch in Bild 5.6.6 gezeigt: Unter  $W/Z = 0,4$  verbleiben unhydratisierte Zementreste; über  $W/Z \sim 0,5$  bis  $0,55$  entstehen zusammenhängende Kapillarporen [1]. Die Mikrostruktur entzieht sich i. w. dem visuellen Aufschluß. Das beispielsweise in Bild 5.6.7 dargestellte Modell [6] zeigt die Bindung und Einlagerung von Wasser.

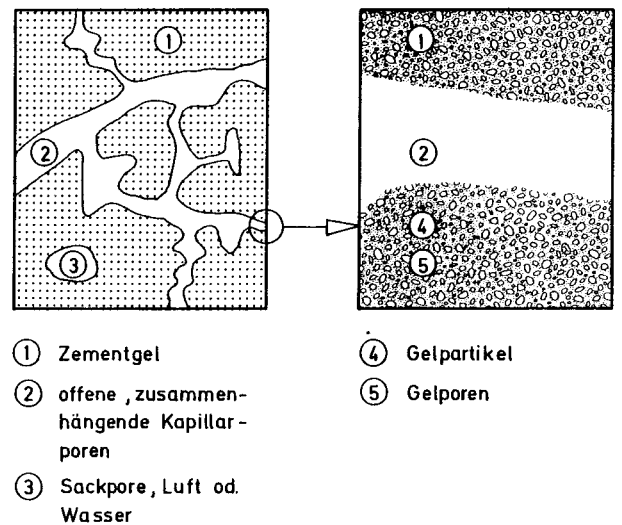


Bild 5.6.5 Struktur des Zementsteins

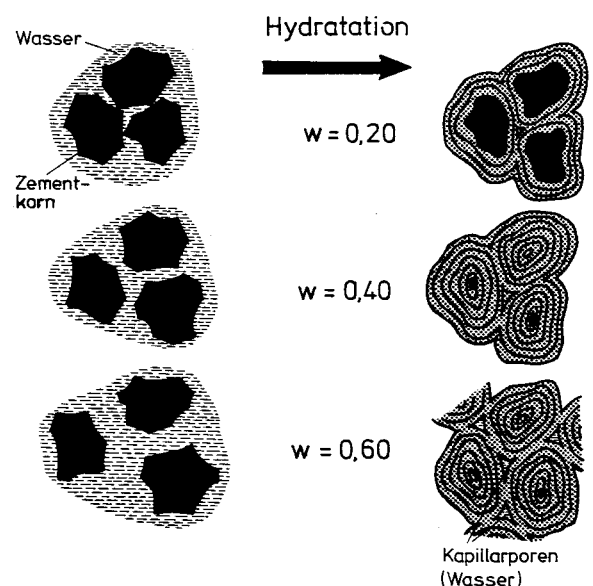


Bild 5.6.6 Hydratation von Zement bei verschiedenen Wasser-Zementwerten (nach Wischers, s. [1])

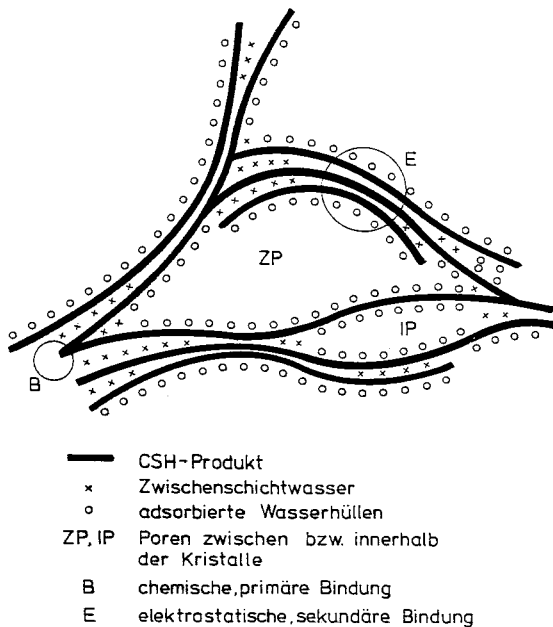


Bild 5.6.7 Feldmann und Sereda-Gelstrukturmodell (s. [6])

### Porosität

Aussagen über die Porosität im Zementstein leitet man in vereinfachter Weise über die volumetrischen Anteile der Komponenten ab. Dabei betrachten wir ein Zementleimgemisch nach Bild 5.6.8 und setzen voraus, daß eine vollständige Hydratation,  $m = 1$ , der Zementkörner stattgefunden hat. Der Zementstein sei wassergesättigt: Es habe kein Wasserverlust durch Trocknung oder durch Bluten stattgefunden;  $W_A = W_0$ .

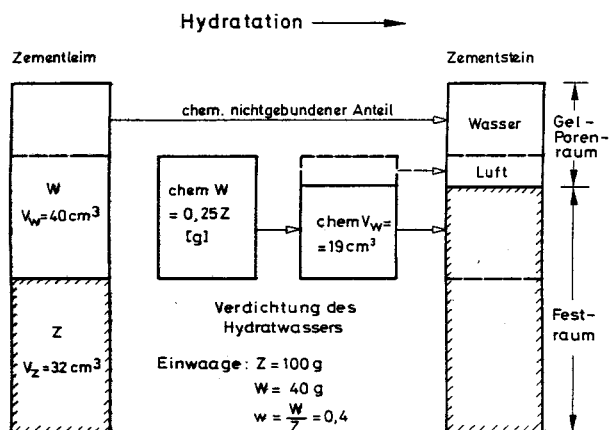


Bild 5.6.8 Stoffraumanteile im Zementstein bei  $W/Z = 0,4$  und vollständiger Hydratation

Von der Anmachwassermenge  $W_A$  werden nur 25% des Zementgewichts chemisch in den Hydratphasen gebunden. Die Masse des Hydratwassers beträgt also:

$$\text{chem } W = 0,25 Z \quad (4)$$

Das Hydratwasser erfährt beim Einbau in das Kristallgitter eine Verdichtung um rd. 24%, so daß sich der zugehörige Stoffraum zu

$$\text{chem } V_w = \frac{0,25 Z}{\rho_w} (1 - 0,24) = 0,19 Z \quad (5)$$

ergibt. Die mit der Verdichtung des Hydratwassers verbundene Volumenverminderung von  $0,06 Z$ , als inneres oder chemisches Schrumpfen bezeichnet, wird äußerlich nicht sichtbar, sondern erzeugt einen Anteil des Gelporenvolumens, der mit Luft gefüllt ist.

Damit teilt sich

$$\text{ges } V = Z (0,32 + w) \quad (6)$$

wie folgt auf:

$$V_{st} = Z \left( \frac{1}{\rho_z} + 0,19 \right) + Z (0,06 + w - 0,25) = \text{ges } V \quad (7)$$

feste Masse    mit Luft    mit Wasser  
                                  gefüllte Poren  
 Gesamtporenraum

Hieraus erhalten wir die Gesamtporosität zu:

$$\text{ges } p = \frac{w - 0,19}{w + 0,32} \quad m = 1 \quad (8)$$

bzw. bei unvollständiger Hydratation  $m < 1$  zu:

$$\text{ges } p = \frac{w - 0,19 m}{w + 0,32} \quad m < 1 \quad (9)$$

Nun interessiert noch die Aufteilung des Gesamtporenraumes in den Gel- und Kapillarporenraum. Dabei kann angenommen werden, daß der Gelporenraum – vorausgesetzt, es ist genügend Wasser zur vollständigen Hydratation vorhanden – nur vom Zementgehalt und vom Hydratationsgrad abhängt:

$$V_{pG} = 0,21 m Z \quad (10)$$

Damit ergibt sich der Kapillarporenraum als Differenz zum Gesamtraum zu:

$$V_{pK} = \text{ges } V_p - V_{pG} = Z (w - 0,19 m - 0,25 m) = Z (w - 0,40 m) \quad (11)$$

Die Porositäten betragen für  $m \leq 1$ :

$$p_G = \frac{0,21 m}{w + 0,32} \quad \text{Gelporosität} \quad (12)$$

$$p_K = \frac{w - 0,40 m}{w + 0,32} \quad \text{Kapillarporosität} \quad (13)$$

Für die vollständige Erhärtung ist ein Mindestwert des Wasserzementwerts von rd.  $\min w \approx 0,4$  erforderlich. Dabei entstehen nur Gel- und noch keine Kapillarporen.

In Bild 5.6.9 sind die Porositäten aufgetragen. Ab  $w = 0,4$  steigt die Kapillarporosität zunehmend an, während die Gelporosität sinkt. Ab  $w < 0,4$  gelten die Linien nicht mehr. Bild 5.6.10 zeigt die Aufteilung der Volumina der Poren und Gelfestmasse in auf das Gesamtvolumen  $\text{ges } V \approx w + 0,32$  bezogener Form.

Im praktischen Bereich des Wasserzementwerts von  $0,4$  bis rd.  $0,8$  verändert sich der Anteil der luft- und wasserge-

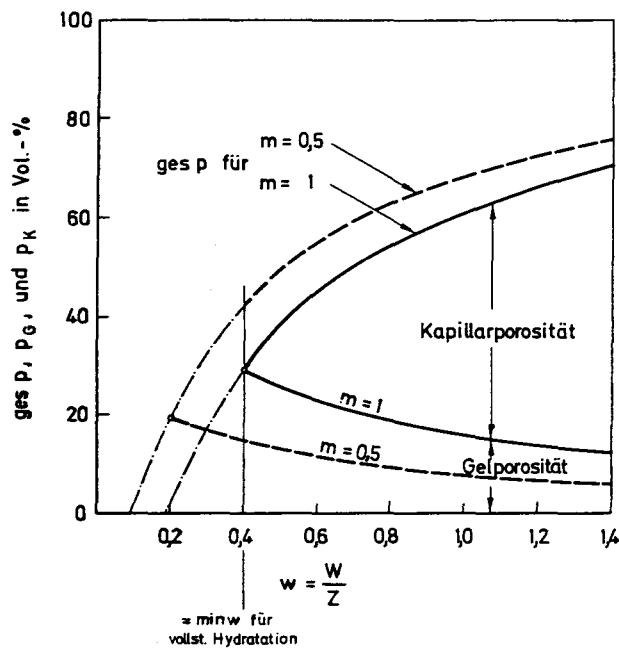


Bild 5.6.9 Abhängigkeit der Porositäten vom Wasserzementwert  $\geq 0,4$

füllen Gelporen nur wenig; der Kapillarporenraum steigt jedoch mit Zunahme des Wasserzementwerts rasch an. Für  $w < 0,4$  ist ein Hydrationsgrad  $m = 1$  nicht mehr möglich; der Zementstein enthält zunehmend nichthydratisierte Zementteilchen.

Durch die Porenvolumina  $V_{pG} + V_{pK} = \text{ges } V_p$  bzw. durch die Porositäten wird der Porenraum insgesamt beschrieben. Wie sich die unterschiedlichen Porengrößen hieran beteiligen, zeigt Bild 5.6.11. Die Häufigkeitsverteilung des je Porenklasse  $\Delta r$  erzeugten Porenraumes zeigt i. d. R. zwei Maxima: bei rd. 400 Å und bei rd. 20 Å. Die mittlere Porengröße beträgt rd. 200 Å. Durch die Erhärtung findet bei Feuchtlagerung eine stete Abnahme des Porenraumes statt.

Wir fassen zusammen:

- Die Porosität ist die wichtigste Strukturgröße des Zementsteins. Mit Zunahme der Porosität über die i. w. konstante Gelporosität hinaus nehmen die Festigkeit und die Dichtigkeit, die für die Dauerhaftigkeit maßgebend ist, ab.
- Die Porosität steigt mit Zunahme des W/Z-Wertes an. Ab  $W/Z > 0,4$  bildet sich die Kapillarporosität in Form zusammenhängender Kanäle aus (ab  $W/Z > 0,5$ ), in denen der Transport von Wasser und Schadstoffen stattfinden kann. Hohe Wasserzementwerte führen nicht nur zu geringer Festigkeit, sondern auch zu verstärktem Schwinden, Quellen und Kriechen.
- Andererseits erfordert die vollständige Zementерhärtung einen W/Z-Wert von mindestens 0,4 und ein Innenklima im Zementstein mit möglichst hoher Feuchte.

#### Bindung des Wassers und Austrocknung

Ausgangspunkt der folgenden, vereinfachten Betrachtung sei ein vollständig durchhydratisierter und wassersatter Zementstein. Der Gel- und Kapillarporenraum ist als voll-

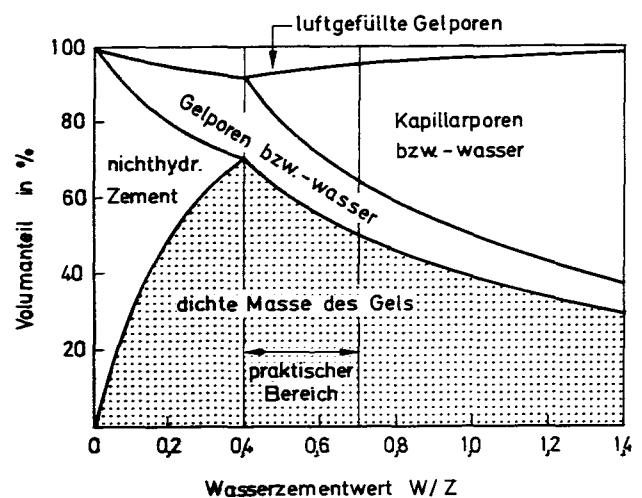


Bild 5.6.10 Volumetrische Anteile im Zementstein in Abhängigkeit vom Wasserzementwert; Hydrationsgrad  $m = 1$

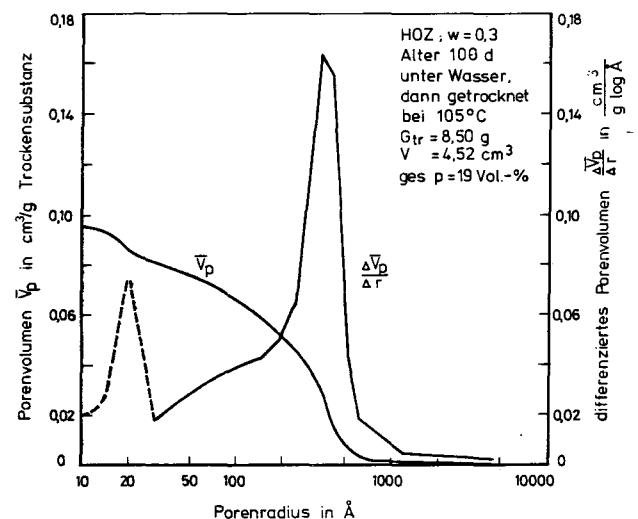


Bild 5.6.11 Porenvolumen und Porenradienverteilung im Zementstein (Beispiel)

ständig wassergefüllt anzusehen. Während das Hydratwasser im Bereich üblicher Temperaturen nicht verdampfbar ist, können das Gelwasser  $W_G$  und Kapillarwasser  $W_K$  durch Trocknung ausgedampft werden. Unmittelbar vor Beginn der Trocknung beträgt die Ausgangswassermenge:

$$W_0 = \text{chem } W + W_G + W_K = Z (0,25 + 0,21 + w - 0,40)$$

Das Gelwasser ist an den Oberflächen der Gelteilchen und in den Gelporen adsorptiv gebunden; auch das Zwischenschichtwasser zählt hierzu. Die Beweglichkeit der Wassermoleküle ist eingeschränkt, weshalb sie i. w. erst bei niedrigen rel. Feuchten vollständig ausgetrieben werden können. Verglichen damit ist die Beweglichkeit des in den viel größeren Kapillarporen eingelagerten Wassers größer. Es ist leichter verdampfbar und wird im Bereich 100 bis 40% r. F. entleert. Menge und Bindungsenergie von Gel- und Kapillarwasser beeinflussen das mechanische Verhalten des Zementsteins nachhaltig.

In Bild 5.6.12 sind die Vorgänge bei der Trocknung dargestellt. Ausgehend von der Wassermenge  $W_0$  verliert der Zementstein Wasser durch Trocknung, bis sich nach gewisser Zeit die Gleichgewichtswassermenge  $W_{gl}$  eingestellt hat, die vom Wasserzementwert und den Lagerungsbedingungen  $\{\vartheta, \varphi\}$  abhängt. Die zu einer Lagerbedingung zugehörige Gleichgewichtsfeuchte  $W_{gl}$  kann man mit den Sorptionsisothermen X und Y des Gel- bzw. Kapillarwassers von Bild 5.6.13 abschätzen [7]. Es ist mit:

$$\left. \begin{aligned} W_G(\varphi) &= XW_G; W_G = \max W_G \\ W_K(\varphi) &= YW_K; W_K = \max W_K \end{aligned} \right\} \text{ bei } \varphi = 100\% \quad (15)$$

$$W_{gl} = \text{chem. } W + W_G(\varphi) + W_K(\varphi)$$

bzw.

$$W_{gl} = 0,25 Z + 0,21 m XZ + (w - 0,40 m) YZ \quad (16)$$

#### 5.6.2.4 Festigkeit

##### Festigkeitsklassen

Die Normzemente werden in den Festigkeitsklassen von Tab. 5.6.7 geliefert (z.B. PZ25). Die Zahl der Festigkeitsklasse stellt die Mindestdruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen dar, die an Probekörpern aus einem Zement-Normsandmörtel nach DIN 1164 festgestellt wird. Durch die Vorgabe einer Obergrenze für 28 Tage-Festigkeit wird das gezielte Herstellen von Beton bestimmter Festigkeit und Wärmetönung ermöglicht. Durch Kennfarben auf Lieferschein und Zementsack sollen Verwechslungen ausgeschlossen werden.

Durch die Kennbuchstaben L und F werden Zemente mit langsamer Anfangserhärtung von solchen mit hoher Frühfe-

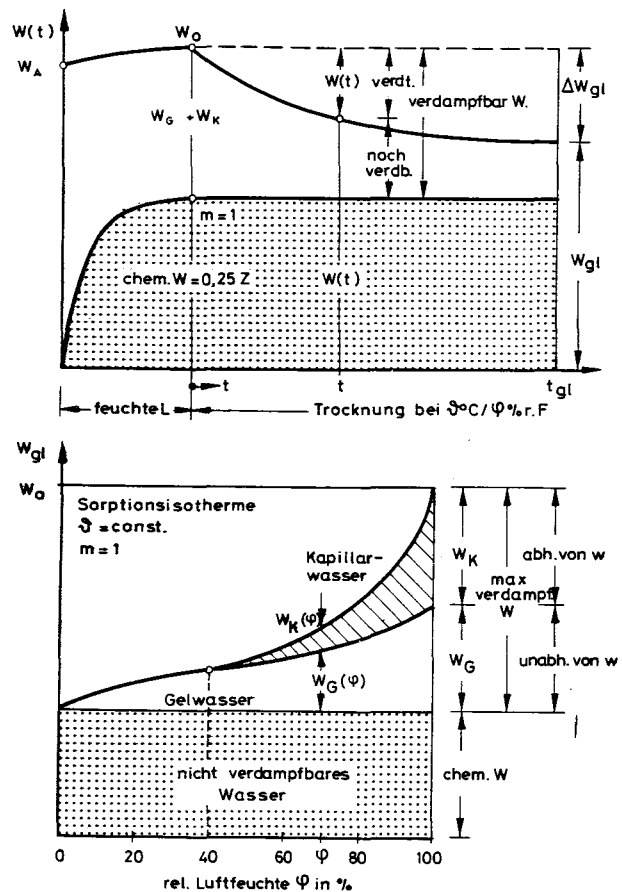


Bild 5.6.12 Trocknungsverlauf und Sorptionsisotherme von Zementstein

Tab. 5.6.7 Festigkeitsklassen, Kennzeichnungen und Einsatzgebiete der Normzemente

Festigkeitsklasse	Druckfestigkeit in MN/m <sup>2</sup> nach				Kennzeichnung		Anfangserhärtung	Nachhärtung	Wärmentwicklung	Einsatzgebiete
	2 d min	7 d min	28d		Kennfarbe	Aufdruckfarbe				
			min	max						
<u>25</u> –	–	10	25	45	violett	schwarz	sehr langsam	beträchtl.	langsam u. niedrig	Massenbeton
L <u>35</u> F	– 10	17,5 –	35	55	hellbraun	schwarz rot	langsam normal	gut normal	langsam u. mäßig mäßig	dicke Bauteile Bauteile üblicher Abmessungen
L <u>45</u> F	10 20	–	45	65	grün	schwarz rot	rasch sehr rasch	normal normal	hoch  zu Beginn höher als L	Bauteile üblicher Abmessungen; frühes Entschalen Winterbau Fertigteilbau
<u>55</u> –	30	–	55	–	rot	schwarz	sehr rasch	mäßig	beträchtlich	Winterbau

L = low  
F = fast



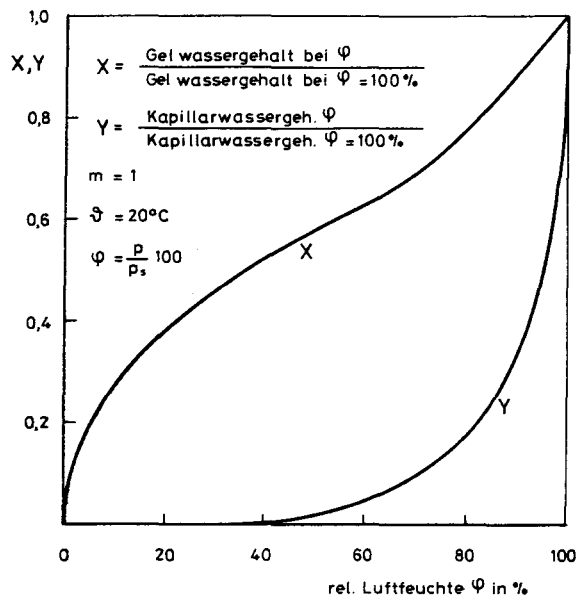


Bild 5.6.13 Bezogene Gehalte an Gel- und Kapillarwasser abhängig von der relativen Luftfeuchte nach Trocknung zur Gewichtskonstanz [7]

stigkeit unterschieden, um den wechselnden Einsatzgebieten und Forderungen der Praxis Rechnung zu tragen (z. B. PZ35L, PZ35F). Die Endfestigkeit des Zementsteins wird erst – dauernde Feuchtlagerung vorausgesetzt – nach längerer Zeit erreicht. Zemente mit hoher Frühhochfestigkeit weisen über die 28-Tage-Festigkeit hinaus einen kleineren Zugewinn an Festigkeit durch Nachhärtung auf als Zemente mit langsamer Anfangserhärtung.

Zemente mit besonderen Eigenschaften: Zemente für Massenbeton, mit niedriger Hydratationswärme, tragen die Zusatzbezeichnung NW: z. B. HOZ25-NW. Bei starkem Sulfatangriff des Betons sind Zemente mit hohem Sulfatwiderstand zu wählen: z. B. HOZ35L-HS. Enthalten die Betonzuschläge alkaliempfindliche Bestandteile, so kann der Gefahr des Alkalitreibens durch Zemente mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt begegnet werden: Kennzeichen: NA.

#### Einfluß des Wasserzementwertes

Es ist für alle festen Stoffe bekannt, daß ihre Festigkeit mit steigender Porosität abfällt und zwar weniger, weil die Poren den inneren tragenden Querschnitt mindern, sondern vielmehr, weil sie als innere Kerben wirken. Wegen der Beziehung

$$\text{ges } p = \frac{w - 0,19 \text{ m}}{w + 0,32} \quad (8)$$

steigt die Porosität mit Zunahme des W/Z-Wertes an. Wir können deshalb erwarten, daß die Festigkeit des Zementsteins bei Steigerung von W/Z sinkt. Bild 5.6.14 zeigt den Zusammenhang zwischen dem W/Z-Wert und der Druck- sowie Biegezugfestigkeit. Die Darstellung erfolgte in bezogener Form, indem die Festigkeit bei W/Z = 0,4 zu 1 gesetzt wurde.

Der Einfluß der Erhärtung ist aus Glg. (8) abzulesen: Je höher der Hydratationsgrad ist, um so geringer wird die Porosität und um so größer wird die Festigkeit bei vorgegebenem W/Z-Wert.

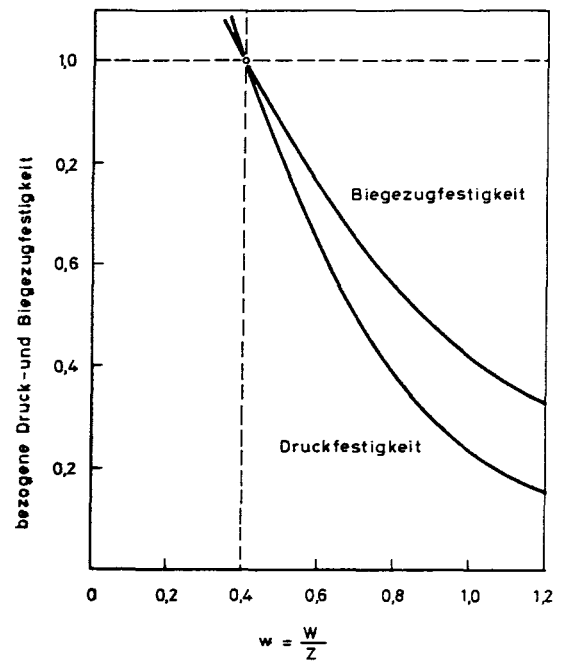


Bild 5.6.14 Zusammenhang zwischen der Biegezug- bzw. Druckfestigkeit von Zementstein und dem W/Z-Wert [2]

#### 5.6.2.5 Mahlfineinheit

Die Mahlfineinheit der Zemente wird als spezifische Oberfläche  $O_z$  in  $\text{cm}^2/\text{g}$  ausgedrückt und wird nach DIN 1164 mit einem Luftdurchlässigkeitsverfahren bestimmt. Als Kleinstwert der Mahlfineinheit sind  $2200 \text{ cm}^2/\text{g}$  erlaubt. Zemente mit  $O_z < 2800 \text{ cm}^2/\text{g}$  sind als grob, Zemente mit  $O_z > 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$  als fein einzustufen.

Die Mahlfineinheit wirkt sich auf die Erhärtungsgeschwindigkeit und auf die Verarbeitbarkeit der Mörtel und Betone aus: Die anfängliche Erhärtungsgeschwindigkeit nimmt mit zunehmender Feinheit zu. Die Konsistenz des Frischbetons wird von der Konsistenz des Zementleims beeinflusst. Grobe Zemente neigen zum Wasserabsondern (Bluten) und erschweren bei mageren Mischungen die Verarbeitung.

#### 5.6.2.6 Raumbeständigkeit

Zemente müssen raumbeständig sein. Damit ist gefordert, daß während der Erhärtung keine Volumenausdehnungen (Treiben) durch chemische Reaktionen auftreten, die das Gefüge des Zementsteins aufsprengen. Folgende Treibererscheinungen können auftreten und zu mangelhafter Raumbeständigkeit führen [1, 5]:

1. Kalktreiben tritt auf, wenn die höchstzulässige Menge an gebranntem Kalk  $\text{CaO}$  überschritten wird. Dieser löst sich verzögert ab und vergrößert als Kalkhydrat sein Volumen. Durch den Kochversuch eines Zementleimkuchens nach DIN 1164 wird diese Gefahr erkannt.
2. Magnesiatreiben entsteht durch die zeitlich verzögerte Hydratation des Magnesiumoxids  $\text{MgO}$  und kann im Kochversuch nicht erkannt werden. Da das Magnesiatreiben erst nach Jahren auftreten kann, ist es gefährlicher als das Kalktreiben. Im Labor kann eine zeitliche Raffung durch den Autoklavversuch nach ASTM C253 (US-Prüf-

norm) vorgenommen und so eine mögliche Gefahr erkannt werden.

3. Sulfatreiben (oder Gipstreiben) entsteht, wenn der zur Erstarrungsregelung zugemahlene Gips an den Aluminatanteil unrichtig angepaßt wurde, so daß sich durch Sulfatüberangebot überwiegend Trisulfat bildet.

Die Raumbeständigkeit der Zemente wird in den Zementwerken laufend überprüft.

#### 5.6.2.7 Verformungen des Zementsteins

Das Verformungsverhalten der Verbundbaustoffe Mörtel und Beton wird – beginnend mit dem frischen Zustand bis ins hohe Alter – nachhaltig vom Verformungsverhalten zunächst des Zementleims, dann des Zementsteins bestimmt. Bei den möglichen Verformungen unterscheiden wir ursächlich nach spannungsunabhängigen und spannungsabhängigen Verformungen, die entweder zeit- oder zeitunabhängig ablaufen können. Bedenkt man, daß Beton zu rd. 70 Vol.-% aus Zuschlägen besteht, die sich unter Spannung nur elastisch und völlig zeitunabhängig deformieren, so erkennt man, daß der Zementstein der wesentliche Träger inelastischer und zeitabhängiger Verformbarkeit sein muß.

Bei den spannungsunabhängigen Verformungen unterscheiden wir nach folgenden Arten:

- a) Schrumpfen im nichterhärteten Zementstein,
- b) Quellen und Schwinden des erhärteten Zementsteins infolge Feuchtaustausch,
- c) Wärmedehnung

Schrumpfen, Quellen und Schwinden sind zeitabhängig.

Die lastabhängigen Verformungen umfassen die

- d) elastischen Verformungen und die
- e) zeitabhängigen Kriechverformungen

Die Arten der Verformungen werden in Abschn. 5.7 unter betontechnischen Gesichtspunkten erneut aufgegriffen.

#### Schrumpfen

Unter Schrumpfen werden Volumenverminderungen des Zementsteins verstanden, die mit dem Erstarrungsbeginn einsetzen und im wesentlichen auf zwei Ursachen beruhen. Zum einen stellt man bei wasserreichen Leimen und grob gemahlten Zementen eine Volumenkontraktion fest, die in der Hauptsache durch Wasserabsondern, Bluten genannt, bedingt ist. Der Vorgang des Blutens kommt noch während des plastischen Zustandes des Zementleimes zum Stillstand. Zum anderen erfährt das Hydratwasser beim Einbau in die CSH-Phasen eine Volumenverminderung, die sich aber nur teilweise in eine äußerlich sichtbare Kontraktion umsetzt, weil sie durch eine innere Porenbildung kompensiert und durch die zunehmend steifere Struktur verhindert wird.

#### Quellen und Schwinden

Quellen und Schwinden sind langandauernde Volumenänderungen (in allen drei Richtungen des Raumes gleich große Längenänderungen) im erhärteten Zustand des Zementsteins, die durch Änderung des Feuchtezustandes des Zementsteins bedingt sind. Das Quellen stellt eine

Volumenzunahme durch Feuchteaufnahme dar; das Schwinden ist Volumenverminderung durch Feuchteabgabe.

Da sich ein z. B. im Ausgangszustand trockener Körper mit endlichen Abmessungen einer erhöhten Umgebungsfuchte nicht spontan anpassen kann, sondern hierzu eine gewisse Zeit benötigt, tritt ein Feuchteprofil über den Querschnitt auf. Dieses Feuchteprofil ist an jeder beliebigen Stelle mit einer dem dortigen Feuchtegehalt entsprechenden freien Quellsdehnung verbunden. Im festen Körper können aber die freien Quellsdehnungen nicht auftreten, sondern nur die mittlere Dehnung, als Quellmaß bezeichnet. Schwinden und Quellen sind immer mit Eigenspannungen verbunden (s. Abschn. 4.1).

Schwind- und Quellmaß sind also stets mittlere Dehnungen, die u. a. von den Körperabmessungen und den Trocknungsbedingungen abhängen. Diese Tatsache ist beim Vergleich von Versuchsergebnissen zu beachten.

Vor allem das Schwinden hat große Bedeutung für die Betonpraxis, da dessen »Vergessen« zu Bauschäden (Risse, Abplatzungen u. a. m.) führen kann.

Doch zunächst zur Beobachtung: Bild 5.6.15 zeigt, daß das Schwindmaß mit abnehmender Geschwindigkeit einem Endwert  $\epsilon_{s\infty}$  zustrebt, der aber erst nach mehreren Jahren erreicht wird. Das Schwinden ist um so größer, je trockener die Umgebungsluft ist. Bei Wasserlagerung bzw. in hoher relativer Feuchte quillt der Zementstein (s. [4] und [5]).

Abgesehen von unterschiedlichen Vorzeichen der resultierenden Dehnungen gehorchen Quellen und Schwinden dem gleichen Mechanismus und sind zum mindesten teilweise reversibel. Der Mechanismus setzt sich vermutlich aus folgenden Teilprozessen zusammen:

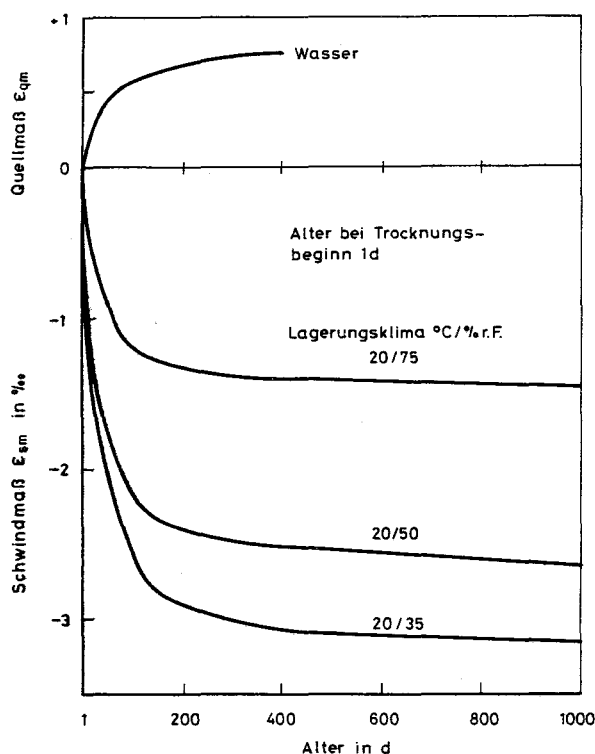


Bild 5.6.15 Typische Zeitverläufe des Schwindens und Quellens von Zementstein

1. Änderung der Oberflächenenergie,  
2. Spaltdruck und  
3. Kapillarwirkung,  
die im folgenden knapp beschrieben werden [6], [8]. Sie hängen mit der Wechselwirkung zusammen, die zwischen dem Wasser und dem Zementstein wegen dessen hoher Porosität und riesigen inneren Oberfläche herrscht.

zu 1. Änderung der Oberflächenenergie:

Ausgehend von einem trockenen, ideal kugeligen Gelteilchen nach Bild 5.6.16 erkennen wir, daß die in der Oberfläche wirkende Oberflächenenergie  $\gamma$  und deren resultierende Kompressionsdruck abnimmt, sobald auf der Oberfläche ein Wasserfilm adsorbiert wird. Damit atmet das elastisch zusammengedrückte Gelteilchen auf; es quillt. Umgekehrt führt das Verdampfen der adsorbierten Wasserhülle bei Trocknung zu einer Kompression des Teilchens; es schwindet. Änderungen der Oberflächenenergie  $\Delta\gamma$  sind vor allem im Bereich niedriger Feuchten  $< 40\%$  r.F. wirksam. Durch die Adsorption nehmen die van-der-Waals-Anziehungskräfte ab, da der Teilchenabstand anwächst, und umgekehrt.

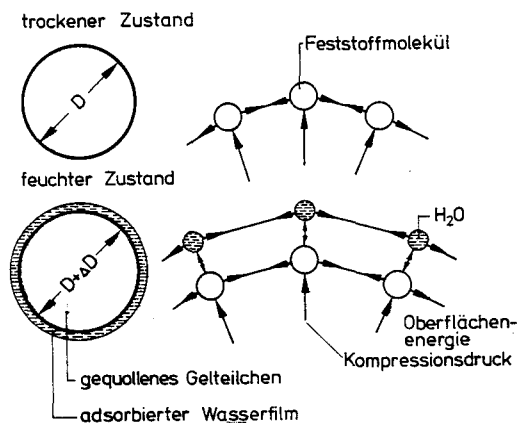


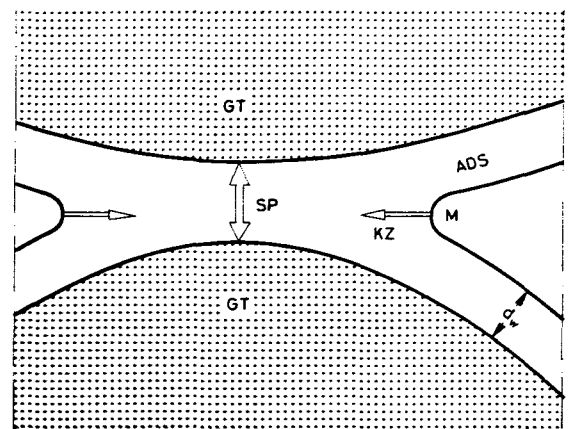
Bild 5.6.16 Quellen von Zementstein durch Verringerung der Oberflächenenergie

zu 2. Spaltdruck

Die Dicke der adsorbierten Wasserschicht ist von der relativen Luftfeuchte im Porenraum abhängig (s. Bild 5.6.17). An Porenzwickeln oder -spalten zwischen benachbarten Gelteilchen, die schmäler als die doppelte Dicke der frei adsorbierbaren Wasserschicht sind, stehen die Wassermoleküle durch Wechselwirkungskräfte unter einem hohen Druck. Dieser Druck wird Spaltdruck genannt. Er weitet das Gefüge auf und erzeugt ein Quellen. Bei Trocknung wird der Spaltdruck abgebaut. Er wirkt bei rel. Feuchten  $> 40\%$  und wird als wesentlicher Teilprozeß für das Schwinden im Bereich hoher relativer Feuchten angesehen.

zu 3. Kapillarwirkung

Bei hohen Wasserzementwerten  $\geq 0,5$  entstehen durchgehende Kapillaren, deren Wasserfüllung bei Trocknung unter Zugspannungen steht (s. Abschn. 4.3). Aus Gleichgewichtsgründen herrschen in der Festmasse Druckspannun-



GT Gelteilchen  
ADS adsorbierte Wasserschicht, Dicke  $d_w$   
SP Spaltdruck; Spaltbreite  $< 2 d_w$   
KZ Kapillarzug  
M Meniskus

Bild 5.6.17 Entstehung des Spaltdrucks

gen, die eine Kompression hervorrufen; der Zementstein schwindet. Aus Gründen, die hier nicht erläutert werden, kann die Kapillarwirkung nur zwischen rd. 40 und 100% r.F. auftreten. Sie ist an diesen Werten etwa null und erzeugt ein Maximum der Schwinddehnung bei rd. 70% bis 80% r.F. Der Anteil der Kapillarwirkung am Schwinden wird als gering eingeschätzt und ist überhaupt nur bei hohem W/Z-Werten von Belang.

Neben diesen Teilprozessen treten beim Schwinden Veränderungen in der Porenstruktur (Zusammenbruch von Porenwänden u.a.m.) auf, die zu einem irreversiblen Schwindanteil führen. Das Schwinden wird durch die Aufnahme von Luftkohlenensäure verstärkt, was jedoch für die in der Praxis üblichen Bauteilabmessungen ohne Einfluß bleibt.

Wie Bild 5.6.18 zeigt, herrscht zwischen dem Schwinden und dem Wasserverlust ein enger Zusammenhang [9]. Der Gesamtwassergehalt  $W(t)$  und der Trocknungsverlust  $\Delta W$  nähern sich dem Ausgleich, das Schwinden dem Endschwindmaß  $\epsilon_{s\infty}$ . Trägt man die bei Trocknungsversuchen mit unterschiedlichen rel. Luftfeuchten gewonnenen Ausgleichswerte  $\epsilon_{s\infty}(\varphi)$  auf, so erhält man die in Bild 5.6.19 dargestellten Isothermen des Schwindens und Trocknungsverlustes, deren ähnlicher Verlauf sofort auffällt. Die unterhalb des Größtwertes von 21 M.-% – obere Bildhälfte – liegende Fläche stellt die Isotherme des verdampfbaren Wassers dar. Den Zusammenhang zwischen Trocknungsverlust und Endschwindmaß macht jedoch erst Bild 5.6.20 sichtbar [10]. Man erkennt, daß bis rd. 40% r.F. das Schwinden proportional zum Wasserverlust verläuft. Ab dort setzt ein verstärktes Schwinden bei geringeren Wasserverlusten ein: der Spaltdruck ist verschwunden, die Gelteilchen werden durch die Abnahme der Oberflächenenergie komprimiert.

In Bild 5.6.19 ist qualitativ eingetragen, wie sich die Teilmechanismen am Schwinden beteiligen. Die proportionale Beziehung zwischen dem Trocknungsverlust und dem

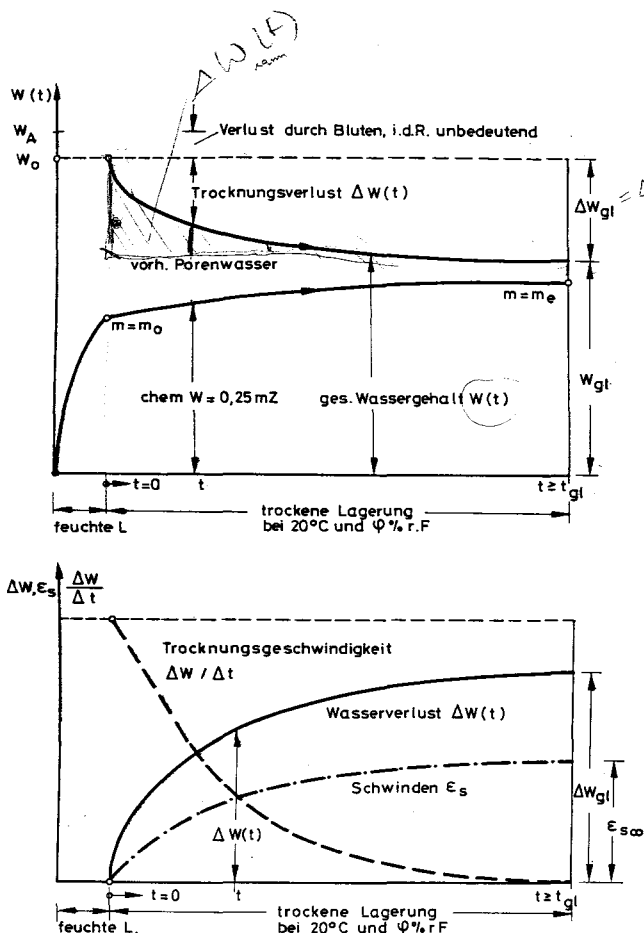


Bild 5.6.18 Austrocknung und Schwinden einer Zementstein- oder Betonprobe

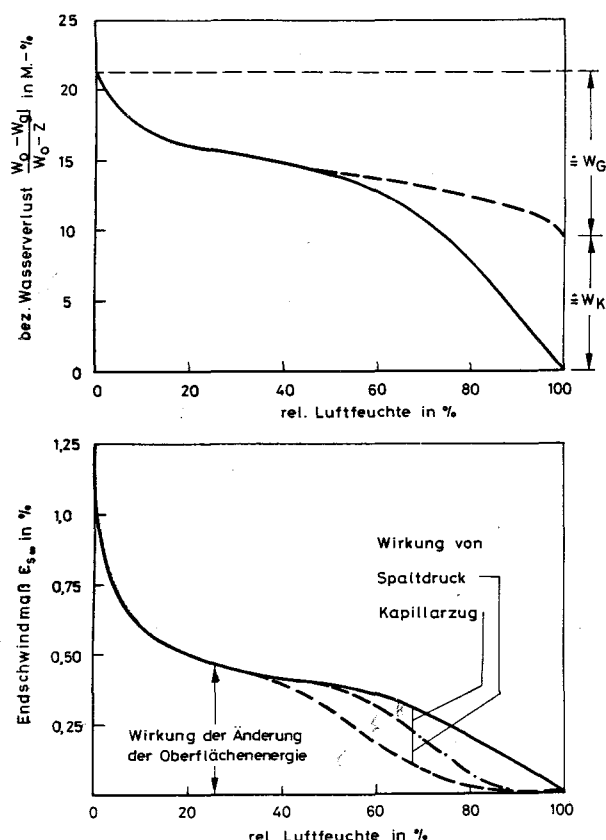


Bild 5.6.19 Ausgleichswasserverlust und zugehöriges Endschwindmaß von Zementstein abhängig von der rel. Luftfeuchte [10]

Schwindmaß kann nach [9] wie folgt angeschrieben werden:

$$\epsilon_{S\infty} \approx k_1 \cdot \frac{W_0 - W_{gl}}{W_0 + Z/q_z} \quad (18)$$

wobei  $k_1$  ein Proportionalitätsfaktor ist. Der Nenner stellt das Ausgangsvolumen  $V$  dar. Mit Abschn. 5.6.2.3 läßt sich zeigen, daß das Endschwindmaß unmittelbar mit der Gesamtporosität verknüpft ist:

$$\epsilon_{S\infty} \approx k_1 \cdot \text{ges } p = k_1 \cdot \frac{0,21 X + Y (w - 0,40)}{w + 0,32} \quad m = 1 \quad (19)$$

Das Schwinden des Zementsteins nimmt zu:

- mit fallender relativer Luftfeuchte und ansteigender Temperatur,
- mit zunehmendem W/Z-Wert und damit zunehmender Gesamtporosität,
- je geringer das Alter bei Trocknungsbeginn ist,
- je höher der Luftkohlensäuregehalt ist,
- je größer das Verhältnis Oberfläche/Volumen des Probekörpers ist (Feuchtefeld; Geometrie- und kein Stoffeffekt) und
- je feiner der Zement gemahlen ist.

Die Art und chemische Zusammensetzung des Zements spielen eine nur untergeordnete Rolle.

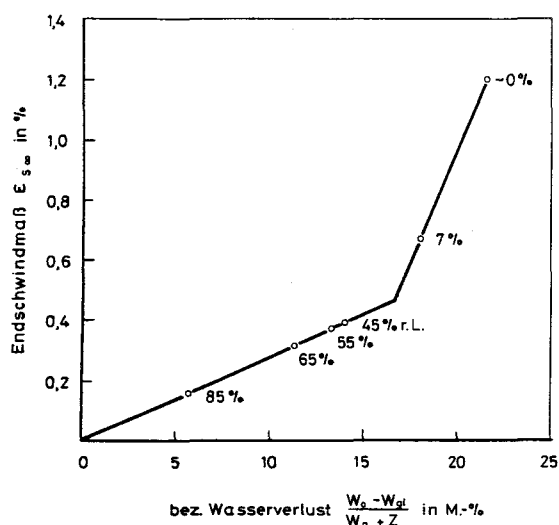


Bild 5.6.20 Beziehung zwischen Wasserverlust infolge Trocknung und Endschwindmaß [10]

### Wärmedehnung

Die Wärmedehnfähigkeit des Zementsteins wird durch die Wärmedehnzahl  $\alpha$  in  $10^{-6}/K$  beschrieben, die allerdings nur beim völlig ausgetrockneten Zementstein temperaturunabhängig ist und rd.  $8 - 10 \cdot 10^{-6}/K$  beträgt. Jedoch auch diese Feststellung gilt nur solange, ehe nicht durch hohe Temperaturen die CSH-Phasen entwässert werden.

Die Wärmedehnzahl feuchten Zementsteins ist zwischen  $-200^\circ C$  und  $+200^\circ C$  von der Feuchtigkeit und der Temperatur abhängig, da thermische und hygrische Vorgänge einander überlagern.

In Bild 5.6.21a ist die Spannungsdehnungslinie des Zementsteins auf Druck dargestellt, wie sie bei Kurzzeitbelastung beobachtet wird. Man erkennt aus dem Unterschied zwischen dem Verhalten bei Be- und anschließender Entlastung, daß sich der Zementstein auch bei kurzzeitiger Spannungseinwirkung nur näherungsweise elastisch verhält. Die bleibenden Dehnungen nehmen bei Annäherung an die Festigkeit zu. Gleichwohl ist es im Bereich der Gebrauchsspannungen statthaft, die elastische Verformbarkeit durch den Elastizitätsmodul zu beschreiben. Der E-Modul ist, ebenso wie die Festigkeit, von der Porosität abhängig: Zunahme von W/Z und damit von  $g$  p vermindert E.

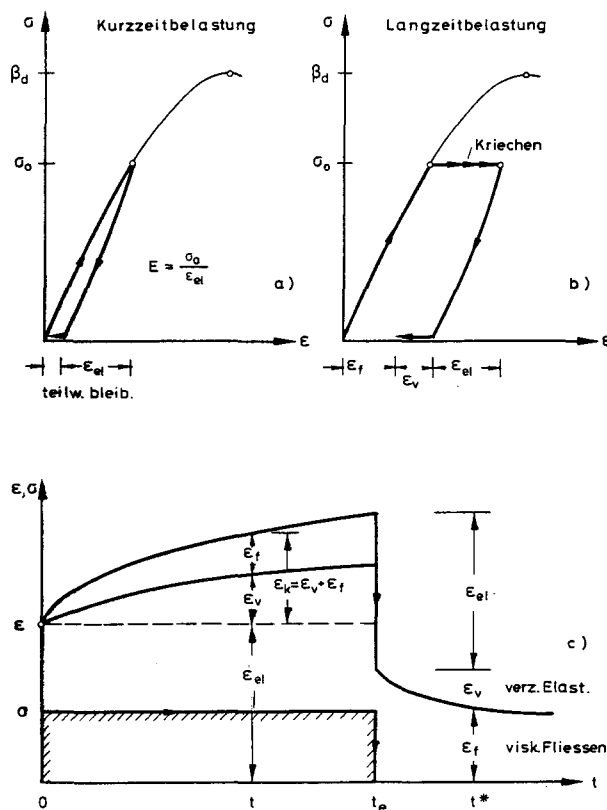


Bild 5.6.21 Verformungsverhalten von Zementstein infolge von Spannungen und Zeit

### Kriechen

Belastet man eine Zementsteinprobe mit einer konstanten Dauerspannung  $\sigma_0$ , die deutlich unterhalb der Materialfestigkeit liegen möge, so beobachtet man nicht nur die spontane, elastische Verformung  $\epsilon_{el}$ , sondern auch eine zeitabhängige, die man Kriechen nennt (s. Bild 5.6.21 b und c). Man stellt fest, daß die Kriechdehnung  $\epsilon_k$  monoton, aber mit abnehmender Kriechgeschwindigkeit zunimmt und um so größer ausfällt, je höher die Spannung  $\sigma_0$  und je geringer das Probenalter ist.

Entfernt man die Spannung zum Zeitpunkt  $t_e$ , so federt der

Körper zunächst um die elastische Dehnung spontan zurück. Daran anschließend beobachtet man, daß darüber hinaus ein Teil der innerhalb der Belastungsdauer entstandenen Kriechdehnung verzögert-elastisch (anelastisch) zurückgewonnen wird. Der verbleibende Anteil von  $\epsilon_k$  ist irreversibel und stellt ein viskoses Fließen dar. Man geht davon aus, daß sich die Kriechdehnung unter Last aus einem anelastischen und einem viskosen Anteil zusammensetzt [5], [4], [11].

Die Ursachen des Kriechens sind noch nicht geklärt. Zweifelsfrei ist jedoch, daß das Kriechen auf der Wechselwirkung des Wassers mit dem Zementsteingefüge beruht und von der Feuchtebewegung infolge Trocknung oder Befeuchtung beeinflusst wird [6, 8, 10]. Weiterhin lehrte die Beobachtung, daß das Kriechen von Proben, die sich mit ihrer Umgebung im hygrischen Gleichgewicht befinden ( $W = W_{gl}(\theta, \varphi)$ ), deutlich kleiner ausfällt, als das Kriechen von Proben, die im belasteten Zustand trocknen ( $W \rightarrow W_{gl}$ ). Es findet also eine Kriechüberhöhung bei gleichzeitigem Trocknen statt.

Ausgehend von dieser Beobachtung hat man das Kriechen in zwei Anteile unterteilt: 1. Grundkriechen und 2. Trocknungskriechen. Dabei umfaßt das Grundkriechen die Verformungen im hygrischen Gleichgewicht, während bei gleichzeitiger Trocknung beide Anteile überlagert auftreten [4], [11].

Das Grundkriechen nimmt nach Münchener Untersuchungen [6], [8], [12], [13] mit zunehmender Ausgleichsfeuchte und zunehmendem W/Z-Wert zu, weil durch die Adsorption von Wasser die Oberflächenenergie der Gelpartikel abnimmt und der Spaltdruck ansteigt. Beide Effekte führen zu einer Gefügauflockerung, verbunden mit erhöhter Kompressibilität. Die Überhöhung des Kriechens bei Trocknung wird damit erklärt, daß die Beweglichkeit der Wassermoleküle in den Zwischenschichten durch die externe Spannung gesteigert wird und innere Gleitungen stattfinden. Den beim Feuchtaustausch wirkenden Eigenspannungen wird ebenfalls ein Einfluß zugeschrieben.

Die Kriechdehnungen steigen an:

- bei Zunahme des W/Z-Wertes und damit der Porosität,
- bei zunehmendem Feuchtegehalt  $W(\varphi)$ ,
- durch gleichzeitiges Austrocknen; um so mehr, je niedriger die rel. Luftfeuchte  $\varphi$  und je höher die Ausgangsfeuchte ist (Einfluß  $W_0 - W_{gl}$ ),
- bei Zunahme der Temperatur,
- bei Belastung im jungen Alter (Einfluß von  $m$ ),
- bei Zunahme der Spannungen.

Die Kriechdehnungen zu einem bestimmten Zeitpunkt hängen im Bereich der Gebrauchsspannung ungefähr linear mit der Spannung (Druck oder Zug) zusammen. Die Zementart übt einen untergeordneten Einfluß aus.

### 5.6.2.8 Weitere Eigenschaften des Zementsteins

Für die Gebrauchsfähigkeit von Betonbauwerken sind noch eine Reihe von Eigenschaften des Zementsteins von Einfluß, wie z. B. seine Dichtigkeit gegenüber Gasen und Flüssigkeiten, seine chemische Widerstandsfähigkeit und sein Verhalten bei Frost und Hitze. Diese Eigenschaften werden im Abschn. 5.7 besprochen, weil sie dort anhand des Verhaltens des Verbundbaustoffes sinnvoller behandelt werden können.

### 5.6.2.9 Normen, Richtlinien

- [N 1] DIN 1164: Portland-, Eisenportland-, Hochofen- und Traßzement. 8 Blätter (unterschiedliche Ausgabedaten).  
[N 2] DIN 51043: Traß, Anforderungen, Prüfung; 1.72.

### 5.6.2.10 Literatur

- [1] Zementtaschenbuch, 47. Ausgabe, 1979/80. Herausgeber: Verein deutscher Zementfabrikanten. Bauverlag 1979. Beiträge von G. Wischers und F. Locher.  
[2] Czernin, W.: Zementchemie für Bauingenieure. Bauverlag. Wiesbaden und Berlin, 3. Aufl. 1977.  
[3] Keil, F.: Zement. Herstellung und Eigenschaften. Springer-Verlag, 1971.  
[4] Neville, A. M.: Properties of Concrete. Pitman Publishing, 1977.  
[5] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile. Bd. 2, Beton, Mauerwerk. 2. Auflage, Bauverlag 1981.  
[6] Wittmann, F.: Grundlagen eines Modells zur Beschreibung charakteristischer Eigenschaften des Betons. DAfStb-Heft Nr. 290, 1977.  
[7] Powers, T. C. und Brownard, T. L.: Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. PCA-Research Bulletin No. 22, 1948.  
[8] Setzer, M. J.: Einfluß des Wassergehalts auf die Eigenschaften des erhärteten Betons. DAfStb-Heft Nr. 280, 1977.  
[9] Hilsdorf, H. K.: Austrocknung und Schwinden von Beton. Rüsck-Festschrift. W. Ernst & Sohn, Berlin 1969.  
[10] Verbeck, G.: The Role of Cement, Water and Aggregates in Shrinkage and Creep of Concrete. Vortrag, U.S.-Japan Joint Seminar on Research on Basic Properties of Various Concretes. Tokio 1968.  
[11] Neville, A. M.: Creep of Concrete: Plain, Reinforced, and Prestressed. North Holland Publ. Co., 1970.  
[12] Wittmann, F.: Bestimmung physikalischer Eigenschaften des Zementsteins. DAfStb-Heft Nr. 232, 1974.  
[13] Ruetz, W.: Das Kriechen des Zementsteins im Beton und seine Beeinflussung durch gleichzeitiges Schwinden. DAfStb-Heft Nr. 183, 1966.

## 5.6.3 Baukalk

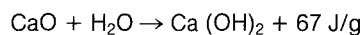
### 5.6.3.1 Arten

Die Arten der Baukalke, die in DIN 1060 [N 1] genormt sind, unterscheiden sich nach dem Erhärtungsverhalten. Die an der Luft vorwiegend durch Carbonathärtung verfestigenden Baukalke nennt man Luftkalke. Mit steigendem Gehalt an Kieselsäure, Tonerde und Eisenoxid entstehen Baukalke, die nach anfänglicher Lagerung an der Luft auch unter Wasser erhärten können. Zu dieser zweiten Gruppe gehören der Wasserkalk, der hydraulische und der hochhydraulische Kalk, die hydraulisch erhärtende Kalke genannt werden. Baukalke sind die Bindemittel für Putze und Mauermörtel, deren Zusammensetzung nach DIN 18550 [N 2] bzw. DIN 1053 [N 3] geregelt wird. Die Ausführung von Putzarbeiten richtet sich nach [N 4].

### 5.6.3.2 Die Erzeugung der Baukalke

#### a) Luftkalke

Zu den Luftkalen gehören der Weiß-, der Dolomit- und der Karbidkalk. Tab. 5.6.8 zeigt die Zusammensetzung. Weißkalk wird durch Brennen von reinem Kalkstein  $\text{CaCO}_3$  unterhalb von rd. 1000 °C hergestellt. Dolomatkalk wird aus dolomitischem Gestein  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$  gebrannt. Karbidkalk ist ein Abfallprodukt der Acetylenherstellung und fällt als Kalkteig an (nicht in DIN 1060 genormt). Der gebrannte Kalk (Brantkalk) reagiert mit Wasser begierig und unter hoher Wärmeentwicklung:



Diesen Vorgang nennt man Löschen. Er wurde früher durch Einsumpfen stückigen Brantkalks auf der Baustelle durchgeführt (Naßlöschen) bis sich ein sämiger Kalkteig ergab, mit dem der Mörtel angemacht wurde. Heute wird Luftkalk entweder als ungelöschter, feingemahlener Brantkalk oder als teilweise bereits werksseitig vorgelöschtes, pulverförmiges Hydrat geliefert (Trockenlöschen). Man bezeichnet diese Handelsform als Feinkalk bzw. Kalkhydrat.

#### b) Hydraulisch erhärtende Kalke

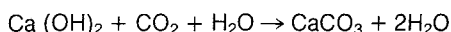
Zu ihnen gehören der Wasserkalk, der hydraulische und der hochhydraulische Kalk, in der Reihenfolge zunehmender Festigkeit. Die Fähigkeit zur hydraulischen Erhärtung wird durch den Anteil an Hydraulefaktoren bestimmt, die entweder bereits im Gestein vor dem Brand enthalten sind oder nachträglich zugemischt werden. Die Hydraulefaktoren sind: Reaktionsfähige Kieselsäure  $\text{SiO}_2$ , Tonerde  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und Eisenoxid  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Wasserkalk entsteht durch Brennen von mergeligem Kalkstein. Der hydraulische und der hochhydraulische Kalk wird durch Brennen von Kalkstein, Dolomit oder mergeligem Kalkstein gewonnen. Der erforderliche Anteil an hydraulischen Stoffen ist entweder vorhanden oder wird zugemischt. Hierfür kommen zur Anwendung: Natürliche Puzzolane (Beispiele: Traß, Kieselgur) und künstliche Puzzolane (Ziegelmehl, Hüttensand, Elektrofilterasche, u. a. m.). Wasserkalk wird entweder als Feinkalk oder als Hydrat geliefert. Die hydraulischen Kalke erfahren keine Trockenlösung vor dem Anmachen des Mörtels.

### 5.6.3.3 Erhärtung

#### a) Luftkalke

Die Luftkalke erhärten durch Carbonatisierung. Unter Einwirkung der Luftkohlenensäure verwandelt sich das Kalkhydrat wieder zu Kalkstein:



Dieser Vorgang benötigt längere Zeit und ist bei einem Putz schneller abgeschlossen als bei einem Mauermörtel (Zutritt von  $\text{CO}_2$  nur über Fugenbreite). Der freie Zutritt von  $\text{CO}_2$  und das unbehinderte Austrocknen muß über mehrere Wochen gewährleistet sein.

#### b) Hydraulisch erhärtende Kalke

Die Erhärtung der hydraulischen Kalke beruht auf zwei Vorgängen. Der eine Vorgang ist die Carbonatisierung der

Tab. 5.6.8 Eigenschaften der Baukalke

	Sorte	Chem. Zusammensetzung <sup>1</sup>		Schüttdichte	Ergiebigkeit je kg Feinkalk	Biegefestigkeit nach		Druckfestigkeit nach		Wesentliche Eigenschaften	Einsatzgebiete
		Gehalt an CaO + MgO	davon MgO			7d	28d	7d	28d		
		M.-%	M.-%			MN/m <sup>2</sup>	MN/m <sup>2</sup>	MN/m <sup>2</sup>	MN/m <sup>2</sup>		
Luftkalke	Weißkalk	≥ 80	≤ 10	≤ 0,5	≥ 2,6	–	–	–	–	große Ergiebigkeit, gutes Wasserrückhaltevermögen u. Geschmeidigkeit; geringe Festigkeit	Innenputze; Mauermörtel der Mörtelgruppe I
	Dolomitkalk	≥ 80	≤ 10	≤ 0,5	≥ 2,6	–	–	–	–		
hydraulisch erhärtende Kalke	Wasserkalk	–	–	≤ 0,7	≥ 2,6	–	–	–	≥ 1,0	gute Verarbeitbarkeit bei gesteigerter Festigkeit	Mörtelgruppe I; Bindemittel für Kalksandsteinherstellung  Putz- und Mauermörtel für der Witterung ausgesetzte Flächen. Bindemittel für Kalksandsteinherstellung
	hydraul. Kalk	–	–	≤ 0,8	–	–	–	–	≥ 2,0		
	hochhydraul. Kalk	–	–	≤ 1,0	–	≥ 0,7	≥ 1,0	≥ 2,5	≥ 5,0		

1 Außerdem muß der CO<sub>2</sub>-Gehalt begrenzt werden (Erhärtung)

Luftkalke; der andere ist eine Hydratation der hydraulischen Stoffe durch Kalkanregung zu CSH-Phasen, die denen des Zementsteins entsprechen. Mit abnehmendem Kalkgehalt bzw. zunehmendem Anteil an Hydraulefaktoren nimmt der Anteil der hydraulischen Erhärtung an der Festigkeitsbildung zu.

#### 5.6.3.4 Wichtige bautechnische Eigenschaften

##### a) Luftkalke

Die Luftkalke werden für Putz und für Mauermörtel der Mörtelgruppe I bei mäßig beanspruchtem Mauerwerk eingesetzt. Sie besitzen besonders gute Verarbeitungseigenschaften: Mörtel mit Luftkalk sind wegen ihrer Geschmeidigkeit und wegen ihres Wasserrückhaltevermögens gut zu verarbeiten. Ihre außerordentliche Feinheit führt zu großer Ergiebigkeit. Der erhärtete Kalkputzmörtel besitzt eine hohe Porosität und eine hohe Adsorptionsfähigkeit von Wasserdampf. Damit ist eine günstige Beeinflussung des Klimas von Innenräumen gegeben. Für Außenputz ist der Luftkalkmörtel wegen seiner hohen Porosität und kapillaren Saugfähigkeit (Niederschlagswasser) nur bedingt geeignet. Da er mit Zement im Kalkzementmörtel mischbar ist, kann die Wasserdichtigkeit auf das gewünschte Maß gesteigert werden.

##### b) Hydraulisch erhärtende Kalke

Da im Wasserkalk nur geringe Anteile von Hydraulefaktoren enthalten sind, überwiegen die bei den Luftkalcken angeführten Eigenschaften; es ist jedoch eine etwas höhere Festigkeit erzielbar.

Die hydraulischen und hochhydraulischen Kalke besitzen eine höhere Festigkeit. Die Verarbeitbarkeit der mit ihnen hergestellten Mörtel ist schlechter als bei Verwendung von Luftkalk, jedoch besser als bei Zement. Anwendung: Mörtelgruppe II, Außenputz.

#### 5.6.3.5 Normen, Richtlinien

- [N 1] DIN 1060: Baukalk, 3 Teile, E 10.80.
- [N 2] DIN 18550: Putz, Baustoffe und Ausführung, 06.67.
- [N 3] DIN 1053: Mauerwerk, Berechnung und Ausführung, T 1, 11.74; T 2, E 02.81; T 4, 09.78.
- [N 4] DIN 18350: VOB, Verdingungsordnung für Bauleistungen. Teil C: Allgemeine Techn. Vorschriften, Putz- und Stuckarbeiten; 10.79.

#### 5.6.3.6 Literatur

- [1] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile. Bd. 2. Beton und Mauerwerk. 2. Auflage, Bauverlag 1981.
- [2] Czernin, W.: Zementchemie für Bauingenieure, 3. Aufl., Bauverlag 1977.
- [3] Piepenburg, W.: Mörtel, Putz und Mauerwerk. 5. Aufl., Bauverlag 1969.

## 5.6.4 Gips

### 5.6.4.1 Arten

Gips ist schwefelsaures Calcium, das in der Natur als Gipsstein in der Form  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , Dihydrat genannt, vorkommt oder bei bestimmten Verfahren als Nebenprodukt abfällt. Durch Wärme wird das Dihydrat entwässert, wobei, wie Tab. 5.6.9 zeigt, der Grad der Entwässerung mit zunehmender Temperatur anwächst. Durch die unterschiedliche Entwässerungstemperatur wird das Festigkeits- und Erhärungsverhalten des Gipsbreis bzw. -mörtels beeinflusst. Mit zunehmender Entwässerung steigen Festigkeit und Abbindezeit an. Die Hydratphasen werden zu pulverförmigen Bindemitteln aufbereitet, die als Baugipse nach DIN 1168 [N 1] genormt sind. In Tab. 5.6.10 sind die Baugipssorten, die Anforderungen an die Festigkeiten und Einsatzgebiete zusammengestellt.

Während der Stuckgips Halbhydrat aus dem Niedertemperaturbereich ( $\alpha$ -Phase) ist, enthält Putzgips daneben bereits Anteile von Anhydrit II, der ein längeres Verarbeiten erlaubt. Die anderen Gipssorten bestehen aus Stuck- und/oder Putzgips mit werkseitig zugemischten Stellmitteln zur Erzielung besonderer Eigenschaften. Stellmittel sind sehr feine, anorganische Stoffe, die die Konsistenz des Gipsbreis oder -mörtels, die Haftung, das Wasserrückhaltevermögen, v.a. aber das Abbindeverhalten günstig beeinflussen sollen. Weiterhin können andere Füllstoffe wie Sand oder Perlit bereits werkseitig zugefügt sein.

Anhydritbinder nach DIN 4208 [N 2] ist ein an der Luft erhärtendes Bindemittel. Es wird aus wasserfreiem Anhydrit hergestellt. Zur Erhärtung ist das gemeinsame Vermahlen mit einem Anreger erforderlich, z.B. gebrannter Kalk. Der Anhydritbinder wird in drei Güteklassen AB 50, AB 125 und AB 200 geliefert: Die Zahlen bedeuten die Mindestdruckfe-

Tab. 5.6.9 Übersicht über die Hydratstufen des Calciumsulfats

Chemische Formel	Hydratstufe (Phase)		Techn. Entstehungstemperatur ca. °C	Bemerkungen
	Bezeichnung	Form		
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Calciumsulfat-Dihydrat			Ausgangsstoff
$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	Calciumsulfat-halbhydrat	$\alpha$	100	nasses Brennen, hohe Festigkeit
		$\beta$	125	trock. Brennen, niedr. Festigkeit
$\text{CaSO}_4$	Anhydrit III	$\alpha$	110	
		$\beta$	290	
$\text{CaSO}_4$	Anhydrit II		300–500 <sup>1</sup>	
$\text{CaSO}_4$	Anhydrit I <sup>2</sup>		1200	

1 bei etwa 900–1050 °C bilden sich durch thermische Zersetzung von  $\text{CaSO}_4$  in geringer Menge  $\text{CaO}$  und  $\text{SO}_3$

2 technisch ohne Bedeutung

stigkeit im Alter von 28 Tagen in  $\text{kp/cm}^2$ . Anhydritbinder werden für widerstandsfähige Putze und schwimmende Estriche verwendet.

Estrichgips wird durch Brennen bei 800–1000 °C gewonnen und benötigt zur Erhärtung ebenfalls freien Kalk als Anreger. Estrichgips besitzt eine hohe Festigkeit und Feuchtebeständigkeit; er wird für schwimmenden Estrich verwendet.

Das Hauptanwendungsgebiet der Baugipse ist das handwerkliche oder maschinelle Putzen von Wänden und Decken. Aus Gründen der Rationalisierung am Bau wurden zahlreiche Gipsfertigfabrikate entwickelt, auf die in Abschn. 5.6.4.4 hingewiesen wird. Weitere Informationen über die Eigenschaften und Anwendungen der Gipse und Gipsprodukte sind in [1], [2], [3] enthalten. Die Putzarbeiten werden nach [N 3] ausgeschrieben.

### 5.6.4.2 Hydratation

Gips ist ein nur an der Luft erhärtendes Bindemittel. Beim Brennen des Rohgipses findet keine chemische Umwandlung statt, sondern es wird das Kristallwasser teilweise oder ganz ausgetrieben. Dementsprechend findet auch bei der Hydratation des Gips-Wasser-Gemisches (Gipsbrei) keine chemische Umwandlung des  $\text{CaSO}_4$  statt: Abbinden und Erhärten ist ein Kristallisationsvorgang. Es wird gerade soviel Kristallwasser wieder aufgenommen, wie zur Bildung von Dihydrat  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  erforderlich ist. Bild 5.6.22 zeigt den vollständigen Kreislauf vom Brennen bis zum Erhärten am Beispiel des Stuckgipses (Halbhydrat  $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ).

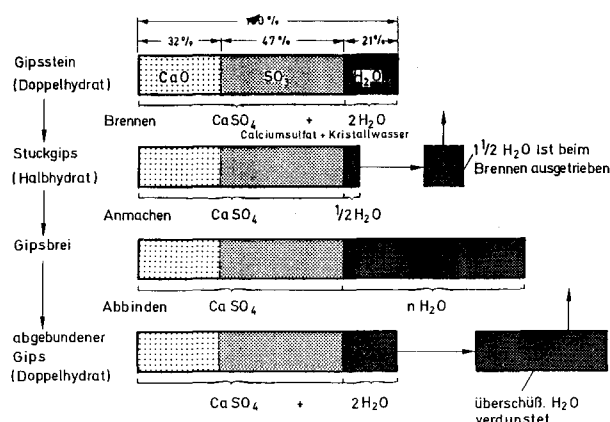


Bild 5.6.22 Veränderungen beim Brennen, Anmachen und Abbinden von Stuckgips

Die zur Erhärtung erforderliche Wassermenge hängt vom Restkristallwasser in der Hydratphase ab. Aus Gründen der Verarbeitbarkeit ist die Anmachwassermenge stets größer. Das Überschußwasser verdunstet. Ein längeres Feuchthalten entfällt daher. Im Gegenteil: Es ist notwendig, daß eine Trocknung in den ersten Wochen nach Verarbeitung stattfindet. Feuchteperioden verzögern die Festigkeitsentwicklung, wie Bild 5.6.23 zeigt. Die Einlagerung des Kristallwassers bringt eine Raumvergrößerung mit sich, die von Vorteil ist; Beispiele: keine Schwindrisse, fester Sitz von eingegipsten Dübeln. Andererseits kann die Raumvergrößerung zu Schäden führen, wenn sie behindert wird: Gipsestriche müssen lose verlegt sein und Dehnfugen aufweisen.



Tab. 5.6.10 Baugipse nach DIN 1168

Baugipssorte	Versteifungsbeginn	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit	Härte	Einsatzgebiete
	Min	MN/m <sup>2</sup>	MN/m <sup>2</sup>	MN/m <sup>2</sup>	
Stuckgips	8–25	≥ 2,5	–	≥ 10	Stuck-, Form-, Rabetz- arbeiten; Innenputz; Gipsbauplatten
Putzgips	≥ 25	≥ 2,5	–	≥ 10	Innenputz- und Rabetzarbeiten
Fertigputzgips	≥ 25	≥ 1	≥ 2,5	–	Innenputz mit Putz- maschinen
Haftputzgips	≥ 25	≥ 1	≥ 2,5	–	Innenputz. Füllstoffe zugesezt
Maschinen- putzgips	≥ 25	≥ 1	≥ 2,5	–	Innenputz, bei Unter- gründen mit schlechter Haftung
Ansetzgips	≥ 25	≥ 2,5	≥ 6,0	–	Ansetzen von Gips- bauplatten
Fugengips	≥ 25	≥ 1,5	≥ 3,0	–	Verfugen von Gips- bauplatten
Spachtelgips	≥ 15	≥ 1,0	≥ 2,5	–	Verspachteln von Stößen von Gipsbauelementen, von Unebenheiten etc.

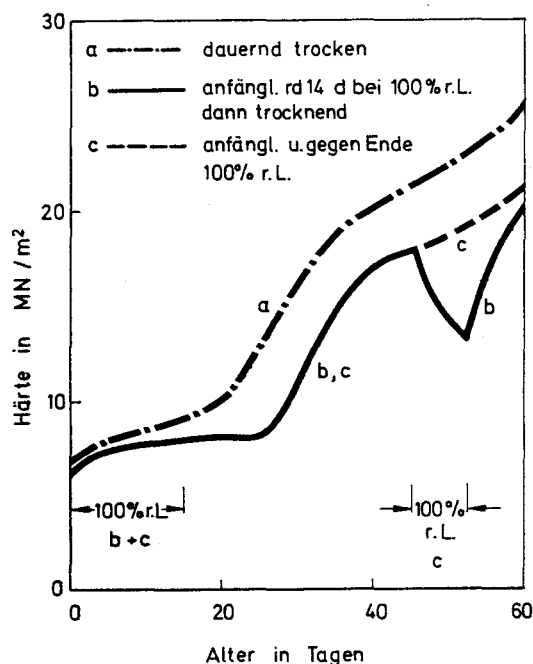


Bild 5.6.23 Erhärtungsverlauf eines Gipsputzes bei unterschiedlichen Trocknungsbedingungen

#### 5.6.4.3 Wesentliche bautechnische Eigenschaften

##### a) Feuchtere regulierung, Oberflächengüte

Das Hauptanwendungsgebiet der Baugipse als Putze oder in Form von Gipsbauplatten oder sonstigen Bauelementen liegt im Innenbereich des Hochbaus. Gips darf nicht dauernd der Feuchte ausgesetzt sein (Zerstörung des Gefüges).

Vorübergehende Feuchtigkeitsspitzen sind unschädlich, da Gips rasch Feuchtigkeit aufnimmt und in Trocknungsperioden wieder abgibt. Diese Eigenschaft des Feuchtigkeitsspeichers ist raumklimatisch sehr vorteilhaft (Regulierung des Raumklimas). Die Oberflächen von Gipsputzen und -bauplatten zeichnen sich durch Ebenheit, Glätte und Härte aus und sind als Untergrund für Tapeten oder textile Bekleidungen sehr geeignet.

##### b) Verarbeitung

Die Verarbeitung der Baugipse kann mit oder ohne Füll- oder Zuschlagstoffe erfolgen. Die Mischung von Gips mit hydraulischen Bindemitteln wie Zement oder hydraulischem Kalk ist unzulässig (Treiben). Die Mischung mit Luftkalk und Zuschlag für Putzmörtel regelt DIN 18550 [N 4]. Eine Vermischung der Sorten Fertigputzgips, Haftputzgips und Maschinenputzgips mit anderen Bindemitteln oder Zuschlägen ist unzulässig, da ansonsten die gewünschten Eigenschaften verlorengehen. Durch die Zusammensetzung der Baugipse und durch die Zugabe von Stellmitteln sind die Verarbeitungseigenschaften und die Gebrauchseigenschaften gesichert (Steuerung der Versteifung, Verarbeitungsdauer u. a. m.). Die Gipsputze trocknen rasch, so daß es eine längere Baufeuchte nicht gibt, sofern für Trocknungsmöglichkeit gesorgt wird (Lüftung).

##### c) Brandschutzwirkung

Gipsputze bzw. -bekleidungen auf Stahl- oder Stahlbaukonstruktionen üben eine vorteilhafte Brandschutzwirkung aus, da das bei Brand ausgetriebene Kristallwasser einen schützenden Dampfschleier bildet (s. DIN 4102).

#### d) Verhalten gegen andere Baustoffe

Abgebundener Gips ist i.w. chemisch neutral. Allerdings besitzt Gips für metallische Bauteile keinerlei schützende Wirkung, da der Zutritt von Feuchte und Sauerstoff nicht behindert wird und das Unterrosten einsetzt. Frische Betone oder Zementmörtel dürfen nicht mit Gips in Kontakt kommen (Gipstreiben).

#### 5.6.4.4 Gipsbauplatten

Gipsbauplatten sind Fertigelemente, die mit dem Ziel der Baurationalisierung entwickelt wurden. Tab. 5.6.11 zeigt in

einer Übersicht die wesentlichen Bauelemente mit Hinweisen auf Normen. Im übrigen werden weitere Informationen in [1] und von [2] gegeben. Die Gipskartonplatte wird in Dicken von 9,5 bis 18 mm und in verschiedenen Regelbreiten und -längen hergestellt. Sie besteht aus dem Gipskern, der allseitig mit Karton ummantelt ist. Neben diesem Bauelement, das am häufigsten angewandt wird, gibt es zahlreiche andere, den Bedürfnissen der Praxis angepaßte Arten [3].

Tab. 5.6.11 Übersicht über Gipsbauplatten

Art	Kurzbez.	Normhinweis	Anwendung
Gipskartonplatten	GKB GKF GKBI GKFI GKP	18 180 und 18 181 18 181 18 181 18 181 18 181	flächige Bauplatten als Wand- und Deckenbekleidungen bzw. Montagewände (DIN 18 183) Feuerschutzplatten durch Imprägnierung verzögerte Feuchteaufnahme s. GKF und GKBI Putzträger für örtl. Gipsputz
Gipskartonverbundplatten	—	18 184	einseitig mit Hartschaum beschichtet zur Verbesserung der Wärmedämmung
Gipswandbauplatten	—	18 163	Wandplatten größerer Dichte für Trennwände
Deckenplatten aus Gips	—	18 169	Dekor-, Schallschluck-, Lüftungs-, Deckenheizplatten, Feuerschutzplatten
sonstige Gipsbauelemente	—	—	Deckenkörper, Gipsfaserplatten, Bausteine u. a. m.

#### 5.6.4.5 Normen, Richtlinien

- [N 1] DIN 1168: Baugipse, T. 1; 05.75 und T. 2; 07.75.  
[N 2] DIN 4208: Anhydritbinder, 10.1962.  
[N 3] DIN 18350: VOB, Teil C, Putzarbeiten, 10.79.  
[N 4] DIN 18550: Putze, 06.67 und Beiblatt, 06.67.

#### 5.6.4.6 Literatur

- [1] Piepenburg, W.: Mörtel, Putz und Mauerwerk. 5. Aufl., Bauverlag 1969.  
[2] Volkart, K.: Bauen mit Gips. Herausgeber Bundesverband der Gips- und Gipsbauplattenindustrie, 1978.  
[3] Informationsschriften des Bundesverbandes der Gips- und Gipsbauplattenindustrie, 1978.

## 5.7 Beton und Mörtel

### 5.7.1 Einleitung

#### 5.7.1.1 Definitionen

Im hier gewählten Sinn ist Beton der Baustoff der unbewehrten und bewehrten Betonkonstruktionen. Er ist ein künstlich hergestellter Verbundbaustoff aus zwei Phasen. Die eine Phase wird vom Zuschlag, einem Gemenge mineralischer

Körner, gebildet. Die zweite Phase ist die Bindemittelphase (Matrix) aus Zementstein, die die Körner verkittet und Hohlräume füllt.

Die Mörtel für Mauerwerk, Estriche und Putze haben prinzipiell die gleiche Werkstoffstruktur wie Beton. Die Zuschlagkörner sind aus vielerlei Gründen viel kleiner als die des Betons.

Das Schwergewicht der folgenden Erläuterungen liegt auf dem Normalbeton nach DIN 1045 [N 1]. Sonderbetone und Mörtel werden nur knapp behandelt, Betone mit anderen Bindemitteln werden nicht besprochen. Eine Auswahl der fortführenden »Betonliteratur« ist in Abschn. 5.7.12 enthalten.

#### 5.7.1.2 Wesentliche Unterscheidungen und Begriffe

In der Praxis haben sich vielfältige Arten, Sorten und Klassen von Betonen eingebürgert ([3], [5], [7]), deren Bezeichnungen die vorrangigen Anwendungen, die Verfahren zur Förderung und Verdichtung u. a. m. widerspiegeln.

##### a) Unterscheidungen nach dem Erhärtungszustand

Durch Vermischung der Ausgangsstoffe entsteht der Frischbeton. Er wird gefördert, eingebaut und verdichtet. Der Frischbeton erhärtet in der Form zu Festbeton, der zur Aufrechterhaltung der Hydratation nachbehandelt werden muß.

#### b) Unterscheidung nach dem Betongefüge

Betone für tragende Konstruktionen nach DIN 1045 [N 1] sind gefügedicht. Durch mechanische Verdichtung des Frischbetons wird ein Hohlraumminimum angestrebt, das Voraussetzung für hohe Festigkeit und gute Dauerhaftigkeit ist.

Für mäßig beanspruchte Bauteile, Betonwaren und für Wand- sowie Deckenbaustoffe wird oft bewußt auf die Gefü-

gедichtheit verzichtet. Durch Haufwerks- oder Zellenporigkeit wird der Wärmedämmwiderstand gegenüber der Festigkeit gesteigert.

#### c) Unterscheidung nach der Festbetonrohddichte

Die gefügedichten Betone werden nach der Trockenrohddichte unterschieden, in der sich die Kornrohddichte des Zuschlags widerspiegelt (siehe Tab. 5.7.1).

Tab. 5.7.1 Betonarten von DIN 1045

Betonart	trockene Festbetonrohddichte kg/dm <sup>3</sup>	Beispiele für den Zuschlag	Anwendungen
Schwerbeton	> 2,8	Schwerspat, Eisenerz, Schrott	Biologische Schutzschilde
Normalbeton	2,0 bis 2,8	Sand und Kies, Splitter, Schotter, HO-Sand und Schlacke	Konstruktionen des Stahl- und Spannbetonbaus
Leichtbeton	< 2,0	Naturbims, Hüttenbims, Blähton, Blähschiefer	wie bei Normalbeton, aber auch für wärmedämmende Bauweisen

#### d) Unterscheidung nach dem Ort der Betonherstellung

Baustellenbeton wird auf der Baustelle, Transportbeton in einem Transportbetonwerk hergestellt. Ortbeton wird für Bauteile unmittelbar an deren Ort im Bauwerk verwendet. Betonfertigteile werden in einem Werk fern der Einbaustelle gefertigt; sie müssen transportiert und montiert werden.

#### e) Unterscheidung nach der Betondruckfestigkeit

Die DIN 1045 unterscheidet die Festigkeitsklassen B nach Tab. 5.7.8 für Normalbeton. Entsprechendes gilt für Konstruktionleichtbeton LB [N 2]. Die Festigkeitsklassen können zwei Betongruppen zugeordnet werden: Die Betongruppe BI umfaßt die Betone niedriger bis mäßiger Festigkeit, die nach Erfahrung oder nach Eignungsprüfung zusammengesetzt werden. Der Betongruppe BII gehören die Betone mit hohen Anforderungen an. Hierauf wird noch später eingegangen.

Beton ist ein Massenbaustoff, dessen Kosten einerseits vom Baustoffbedarf und andererseits vom Aufwand für Verarbeitung und Nachbehandlung bestimmt werden. Während die Baustoffkosten mit dem Zementgehalt anwachsen, nehmen die Kosten der Verarbeitung ab. Der Beton muß deshalb so zusammengesetzt und verarbeitet werden, daß bei Einhaltung der angestrebten Eigenschaften ein Minimum der Festbetonkosten erreicht wird.

## 5.7.2 Ausgangsstoffe

### 5.7.2.1 Zement

Die wesentlichen Eigenschaften der Normzemente nach DIN 1164 sind bereits in Abschn. 5.6 behandelt worden, der auch Kriterien zur Auswahl des Zements für eine bestimmte Betonanwendung enthält; Näheres siehe in [11].

### 5.7.1.3 Zusammenhang zwischen Eigenschaften und Herstellkosten

Im Gegensatz zu vielen anderen Baustoffen ist Beton ein Baustoff nach Maß. Durch Wahl der Ausgangsstoffe und durch deren Zusammensetzung ist der Beton auf jene Leistungen einstellbar, die im Bauwerk erforderlich sind. Diese Leistungen können u. a. folgenden Eigenschaften zugeordnet werden:

- Druckfestigkeit
- Dauerhaftigkeit
- Widerstand gegen besondere Beanspruchungen (z. B. Hitze).

Jede dieser Eigenschaften setzt die vollständige Verdichtung des Frischbetons zu einem dichten und homogenen Gefüge voraus. Dies erfordert eine gute Verarbeitbarkeit des Betons, die damit sowohl die wichtigste Eigenschaft des Frischbetons als auch Voraussetzung für die angestrebte Festbetonqualität wird.

### 5.7.2.2 Zugabewasser

Das Zugabewasser ist das beim Mischen des Betons zugegebene Wasser. Zusammen mit der Feuchte des Zuschlags bildet es das Anmachwasser W, das zur Erhärtung des Zementsteins aber auch für die Verarbeitbarkeit benötigt wird.

Als Zugabewasser sind neben Trinkwasser fast alle natürlichen Süßwässer (Regenwasser, Grundwasser u. a.) geeignet, sofern sie nicht durch Geruch, Trübung, Farbe u. a. Anlaß zu Bedenken geben. In diesem Fall wird die Wasseranalyse notwendig, die sich stets empfiehlt, wenn Wasser benutzt werden muß, über das keine Erfahrungen vorliegen. Ggf. müssen Eignungsversuche angestellt werden, um etwaige Störungen im Erhärtungsablauf und in der Festigkeitsentwicklung aufzudecken.

Wasser mit einem hohen Chloridgehalt, wie z. B. Meerwasser, kann wegen der Gefahr von Stahlkorrosion nur für unbewehrten Beton verwendet werden. Wegen der erhöh-

ten Korrosionsempfindlichkeit der Spannstähle darf das Zugabewasser für Spannbeton und Einpreßmörtel einen Chloridgehalt von höchstens 600 mg/l aufweisen (s. DIN 4227).

### 5.7.2.3 Betonzusatzmittel

Durch die Zugabe von Betonzusatzmitteln (chemische Substanzen) sind bestimmte Eigenschaften des Frisch- und Festbetons gezielt beeinflussbar. Die Beeinflussung erfolgt durch chemische und/oder physikalische Wirkungen. Die Wirksamkeit von Betonzusatzmitteln und ihre Beton- sowie

Bewehrungsunschädlichkeit muß durch Eignungsprüfungen bewiesen sein. Sie sind bauaufsichtlich zugelassene Stoffe.

Die Betonzusatzmittel können Wirkungsgruppen zugeordnet werden. In Tab. 5.7.2 sind die angestrebten Wirkungen in Stichworten dargestellt (Näheres s. in [3]). Die Zugabemenge von Betonzusatzmitteln ist gering und bewegt sich zwischen 1 bis 6 kg je m<sup>3</sup> Beton. Die gleichmäßige Verteilung im Beton wird durch Auflösen oder Dispergieren im Zugabewasser erreicht. Bereits geringe Fehldosierungen können sich sehr nachteilig auf die Betoneigenschaften auswirken.

Tab. 5.7.2 Übersicht über die Wirkung von Betonzusatzmitteln und Einpreßhilfen

Kurzzeichen	Betonzusatzmittel	chem./phys. Wirkung	betontechnische Wirkung
BV	Betonverflüssiger	Verminderung der Oberflächenspannung des Wassers	Verbesserung der Verarbeitbarkeit bei verringertem Wasseranspruch
FM	Fließmittel	wie bei BV	Verflüssigung und sehr leichte Verarbeitbarkeit des Frischbeton
LP	Luftporenbildner	Entstehung feinsten Luftporen	Erhöhung des Frost- und Tausalzwidestands
DM	Betondichtungsmittel	innere Hydrophobierung oder Porenverschluß durch Quellen	Erhöhung der Wasserundurchlässigkeit
VZ	Erstarrungsverzögerer	Hemmung der Hydratation	Verzögerung des Erstarrungsbeginns von Beton
BE	Erstarrungsbeschleuniger	beschleunigtes Anlösen des Zements	Steigerung der Frühfestigkeit
EH	Einpreßhilfe	Quellen durch Gasbildung	Verbesserung des Fließvermögens und Verringerung des Wasserabsetzens von Einpreßmörtel für Spannbeton

### 5.7.2.4 Betonzusatzstoffe

Die Betonzusatzstoffe nach DIN 1045 sind feinste mineralische Stoffe, deren Zugabemenge so groß ist, daß sie bei der Betonrezeptur berücksichtigt werden muß. Durch ihre Zugabe können bestimmte Frisch- und Festbetoneigenschaften verbessert werden, wie z. B.:

a) Verbesserung der Verarbeitbarkeit und Reduktion des Blutens (Wasserabsonderung) des Frischbetons durch ihre geringe Korngröße (< 0,25 mm) und durch ihre kugelige Form.

b) Verbesserung der Wasserundurchlässigkeit.

c) Beteiligung an der Festigkeitsbildung durch glasige Anteile (amorphes und reaktionsfähiges SiO<sub>4</sub> erhärtet infolge alkalischer Anregung durch Calciumhydroxid).

In Tab. 5.7.3 wird ein Überblick über Betonzusatzstoffe gegeben, zu denen auch Pigmente (Körperfarben) zur homogenen Einfärbung von Beton gehören (siehe DIN 53237). Nachteile für die Erhärtung, Festigkeitsbildung und Dauerhaftigkeit des Betons sowie für den Korrosionsschutz der Bewehrung dürfen nicht entstehen. Sofern ein Betonzusatzstoff nicht der Zuschlagnorm [N 3] entspricht, darf er nur

Tab. 5.7.3 Mineralische Betonzusatzstoffe und Wirkungen

Stoff	Beispiele	Festigkeitsmitwirkung	Wirkungen
Gesteinsmehle	Kalkstein- und Quarzmehl	inert	Verbesserung der Verarbeitbarkeit
natürl. Puzzolane	Traß	i. w. inert	Verbesserung der Verarbeitbarkeit und Dichtigkeit
künstl. Puzzolane	Flugasche, Hüttensandmehl	latent-hydraulisch	wie oben; außerdem Reduktion der Abbindewärme und Festigkeitsbildung
Körperfarben	Titandioxid, Ruß	inert	Einfärbung

mit bauaufsichtlichem Bescheid eingesetzt werden. Dies gilt v. a. für künstliche, latenthdraulische Stoffe wie Flugaschen (Elektrofilterasche bei Steinkohleverstromung) insbesondere dann, wenn sie auf den Zementgehalt angerechnet werden soll. Traß ist nach DIN 51 043 genormt. Die Verwendung von Flüssigkunststoffen als Betonzusatzstoffe ist noch in der Erprobungsphase (Polymermodifikation von Beton) [14].

#### 5.7.2.5 Betonzuschlag

##### *Zuschlagarten*

Unter Zuschlag versteht man ein Gemenge von Körnern unterschiedlicher Größe, die für den hier behandelten Normal- und Leichtbeton mineralischen Ursprungs sind. Der Zuschlag kann aus natürlichen Vorkommen (z. B. glaziale Ablagerungen oder Steinbruch) gewonnen werden oder künstlich hergestellt sein (z. B. aus Hochofenschlacke). Tab. 5.7.4 enthält einige Stoffeigenschaften von natürlichen Zuschlägen. Nach dem Gefüge unterscheidet man dichte und porige Zuschläge, wobei die dichten Zuschläge als Normalzuschläge (für Normalbeton) und die porigen Zuschläge als Leichtzuschläge (für Leichtbeton) bezeichnet werden. Betonzuschläge sind nach DIN 4226 [N 3] genormt und güteüberwacht. In Tab. 5.7.5 sind die zusätzlichen Benennungen der Zuschläge aufgeführt; Tab. 5.7.6 enthält einige der üblichen Betonzuschläge.

##### *Eigenschaften des Zuschlags*

Da der Zuschlag üblich zusammengesetzter Betone einen Stoffraumanteil von 65 bis 80% pro Kubikmeter Beton einnimmt, übt er auf die Eigenschaften des Frisch- und Festbetons einen nachhaltigen Einfluß aus. An seine Eigenschaften werden Anforderungen geknüpft, die nachstehend erläutert werden.

##### *a) Rohdichte und Porosität*

Alle anorganischen Zuschläge, ob in der Natur gewonnen oder künstlich hergestellt, bestehen i. w. aus Kieselsäure, Kalk und Tonerde. Ihre Reindichte  $\rho$  schwankt deshalb nur zwischen 2,5 und 3,0 kg/dm<sup>3</sup>. Demgegenüber bewegt sich die Kornrohichte  $\rho_k$  im weiten Bereich, da sie neben der Art des Zuschlags v. a. von der Kornporosität abhängt (s. Tab. 5.7.6). Die Kornporosität als Verhältnis des Porenvolumens zum Gesamtvolumen des Kornes beträgt:

$$p = 1 - \frac{\rho_k}{\rho} \leq 1 \quad \rho_k \leq \rho$$

Sie ist bei dichten Zuschlägen sehr gering. Porige Zuschläge erreichen Werte bis zu 50%.

##### *b) Festigkeit und Elastizitätsmodul*

Festigkeit und Elastizitätsmodul hängen von der Gesteins- bzw. Zuschlagsart und von der Kornporosität ab: Mit Zunahme der Kornporosität sinken Festigkeit und E-Modul. Der für Normalbeton verwendete dichte Normalzuschlag beeinflusst die Betonfestigkeit wenig, weil die Zementsteinfestigkeit unter der Festigkeit der natürlichen Zuschlaggesteine liegt. Die hohe Kornporosität der Leichtzuschläge hingegen führt zu Korneigenfestigkeiten, die sowohl niedri-

ger als auch höher als die des Zementsteins sein können. Der E-Modul des Betons wird von dem der Zuschläge deutlich beeinflusst.

##### *c) Wasseraufnahme und Feuchte*

Hier muß das Verhalten dichter und poriger Zuschläge unter den üblichen Lagerungsbedingungen gesondert betrachtet werden.

Die Eigenfeuchte eines Zuschlagkorns besteht aus zwei Anteilen: Oberflächen- und Kernfeuchte. Die Oberflächenfeuchte wird durch einen äußeren Wasserfilm um das Korn gebildet. Die Kernfeuchte lagert in den offenen und geschlossenen Kornporen. An der Erhärtung des Zementsteins nehmen nur die Oberflächenfeuchte und der Kernfeuchteanteil der offenen Poren teil. Darüber hinaus können die Zuschlaggemische zusätzliche Feuchte in den Kornzwischenräumen enthalten (infolge Regen). Diese Anteile müssen zur Festlegung der Betonrezeptur durch Trocknen und Wiegen vorweg bestimmt und dann dem gesamten Anmachwasser des Betons angerechnet werden.

Bei natürlichen, dichten Zuschlägen ist die Wasseraufnahme und damit die Kernfeuchte gering (s. Tab. 5.7.4). Die Eigenfeuchte wird überwiegend durch die Oberflächenfeuchte gebildet. Sie wirkt sich als Auflockerung des Zuschlaggemisches aus, die um so größer ausfällt, je kleiner der Korndurchmesser ist. Feinsand kann 10 M.-% und mehr Eigenfeuchte aufweisen.

Porige Zuschläge besitzen ein hohes Wasseraufnahmevermögen, das mit der Kornporosität ansteigt und das beim Entwurf einer Leichtbetonrezeptur bekannt sein muß.

##### *d) Frostwiderstand*

Der Frostwiderstand eines Zuschlags hängt von der Kornporigkeit und von der Kernfeuchte ab. Je dichter der Zuschlag, um so größer ist sein Frostwiderstand.

##### *e) Schädliche Bestandteile und ihre Wirkung*

Zuschläge können Stoffe enthalten, die schädliche Einflüsse auf sowohl den Frisch- als auch den Festbeton ausüben.

*Abschlämbbare Bestandteile* sind häufig lehm- oder tonhaltige Stoffe ( $d < 0,063$  mm; Schluff), die an den Zuschlagkörnern haften und so den Verbund zwischen Korn und Zementstein schwächen.

*Stoffe organischen Ursprungs* wie Humus, Torf und Kohle stören den Erhärtungsablauf und führen zu Schäden in der Betonoberfläche. *Erhärtungsstörende Stoffe* sind auch zukerähnliche Stoffe.

*Schwefelverbindungen*, v. a. in Form von Sulfaten (z. B. Gips  $\text{CaSO}_4$ ), können, wenn sie in feinverteilter Form und in größerer Menge vorliegen, durch Reaktion mit dem  $\text{C}_3\text{A}$  des Zements zu Treiben führen (s. Abschn. 5.7.8.6).

*Alkalireaktive Minerale im Zuschlag* wie Opalsandstein, reaktionsfähiger Flint u. a. können bei ausreichender Feuchtezufuhr mit den Kalium- und Natriumhydroxiden des Zements reagieren und zum Alkalitreiben (s. Abschn. 5.7.8.6) führen.

Tab. 5.7.4 Stoffeigenschaften einiger natürlicher Zuschlaggesteine

Gesteinsart	Reindichte $\rho_p$	trock. Korn- rohdichte $\rho_k$	Wasser- aufnahme	Quellen und Schwinden	Wärme- dehnzahl $\alpha_T$	Druckfestigkeit d. trock. Stoffs
	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	M.-%	‰	10 <sup>-6</sup> /°C	N/mm <sup>2</sup>
Ergußgesteine wie Granit, Diabas, Gabbro, Basalt u. a.	2,60 bis 3,00	2,60 bis 3,00	0,1 bis 0,5	0,05 bis 0,10	8 bis 10	150 bis 400
Ablagerungsgesteine wie Grauwacke, Kalkstein, Dolomit u. a. quarz. Sandstein Naturbims, Lava- schlacke, Tuffe	2,60 bis 2,90	2,60–2,85	0,2 bis 0,5	≈ 0,10	8 bis 10	20 bis 300
	2,65 2,50 bis 2,80	2,0 bis 2,6 0,5 bis 2,50	0,2 bis 0,5 bis 15	≈ 0,10	12 8 bis 10	30 bis 200
Umwandlungsgesteine wie Gneis, Quarzit, Mar- mor, Serpentin u. a.	2,65 bis 3,00	2,65 bis 2,80	0,2 bis 0,5	≈ 0,10	8 bis 10	80 bis 250

Tab. 5.7.5 Zusätzliche Benennung des Zuschlags

Zuschlag mit		Zusätzliche Benennung für	
Kleinstkorn	Größtkorn	ungebrochenen Zuschlag	gebrochenen Zuschlag
mm	mm		
	0,25	Feinst-Sand	Feinst-Brechsand
	1	Fein-Sand	Fein-Brechsand
1	4	Grob-Sand	Grob-Brechsand
4	32	Kies	Splitt
32	63	Grobkies	Schotter

Tab. 5.7.6 Einige natürliche und künstliche Betonzuschläge

Bez.	natürliche Zuschläge				künstliche Zuschläge	
	nicht gebrochen	$\rho_k$ kg dm <sup>3</sup>	gebrochen	$\rho_k$ kg dm <sup>3</sup>	gebrochen und/oder gerundet	$\rho_k$ kg dm <sup>3</sup>
Normal- zuschläge	Sand und Kies aus Gru- ben, Flüssen und Seen	2,6 bis 2,7	Brechsand, Splitt und Schotter aus Steinbruch	2,6 bis 2,7		
Leicht- zuschläge	Naturbims Lavasand und -kies	~ 0,5 ~ 0,8	Schaumlava Tuff	~ 0,8 ~ 2,0	Blähperlite Blähglimmer Blähton Blähschiefer Ziegelsplitt Hüttenbims Sinterbims	0,1 ÷ 0,3 1,0 ÷ 2,0 ~ 1,5 0,5 ÷ 1,8

#### f) Korngruppe und Kornform

Zur Bestimmung der Gehalte an schädlichen Bestandteilen gibt es genormte Prüfverfahren (s. [N 3], [3], [7]). Die gemessenen Gehalte dürfen bestimmte Obergrenzen nicht überschreiten. In Abhängigkeit von den Gehalten können betontechnologische Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

Der Betonzuschlag liegt i. d. R. als Gemenge mit weit auseinanderliegenden Korngrößen vor. Die zielsichere Herstellung von Beton gleichbleibender Verarbeitbarkeit erfordert die Aufbereitung des Gemenges zu Korngruppen, die beim Hersteller durch Sieben u. a. erfolgt.

Einige in der Praxis übliche Korngruppen sind (Korngrößen = Sieblochwerte in mm): 0/1; 0/4; 4/8; 8/16; 16/32; 32/63. Am Beispiel der Korngruppe 8/16  $\triangleq$  8 mm bis 16 mm Korn-durchmesser sollen einige Begriffe erläutert werden. Eine bestimmte Menge der Korngruppe wird durch einen Prüfsiebsatz gesiebt; die Angaben auf der Abszisse von Bild 5.7.1 entsprechen den Öffnungsweiten der jeweiligen Siebe. Das Ergebnis der Siebung wird als Sieblinie aufgetragen. Ideal dürften weder kleinere Körner als 8 mm noch größere Körner als 16 mm in der Korngruppe vorhanden sein.

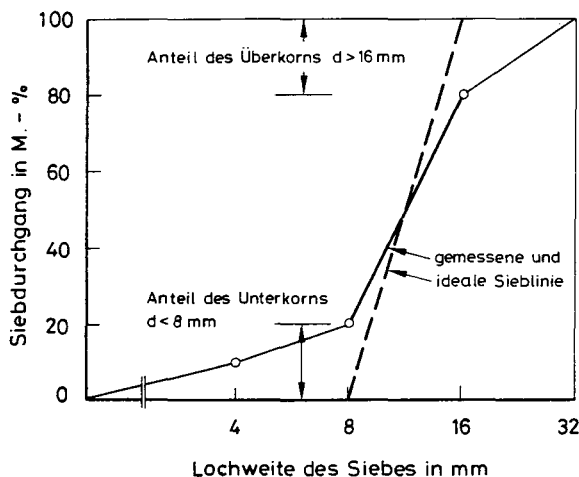


Bild 5.7.1 Sieblinie (Kornverteilung) einer Korngruppe

Tatsächlich treten aber stets Anteile von Über- und Unterkorn auf, die auf rd. 10% begrenzt werden müssen. Die Korngruppen werden zum Betonhersteller geliefert, der aus ihnen das Zuschlaggemisch zusammensetzt (Kornzusammensetzung).

Die Kornform hängt vom Vorkommen bzw. von der Art der Gewinnung oder Herstellung ab. Sand und Kies sind natürlich gerundet, während Splitt und Schotter kantig und bruchrauh sind. Gedrunenes Korn (rund oder würfelig) ist plattigem oder länglichem vorzuziehen, weil es zu einer besseren Verarbeitbarkeit des Betons führt.

#### 5.7.2.6 Kornzusammensetzung des Zuschlaggemisches für Normalbeton

##### a) Vorüberlegungen

Die Menge des Betonzuschlags und dessen Kornzusammensetzung werden nach Gesichtspunkten festgelegt, die sich von der Kostenseite und von den gewünschten Frisch- und Festbetoneigenschaften ableiten:

- Die Normalzuschläge sind fester und dauerhafter als der Zementstein; sie kosten weniger als Zement. Daher soll der Stoffraumanteil des Zuschlags möglichst groß bzw. der Zementgehalt möglichst klein sein.
- Im Frischbeton hat der Zementleim (Zement + Wasser mit  $w = W/Z$ ) die Aufgabe eines Schmiermittels für die Verarbeitung, das die Körner umhüllt und die Hohlräume verfüllt. Daher muß der Zuschlag für einen minimalen Zementleimbedarf möglichst grobkörnig und hohlraumarm zusammengesetzt sein.

Legt man die Kornzusammensetzung allein auf Basis dieser Forderungen fest, so ergibt sich ein schwer verarbeitbarer und schlecht verdichtbarer Beton. Aufgrund praktischer Erfahrungen muß man Kompromisse treffen: Die Zuschlagmenge und ihr Kornaufbau sind so festzulegen, daß bei einem kleinstmöglichen Zementleimbedarf eine optimale Verarbeitbarkeit und eine möglichst vollständige Verdichtung erzielt werden. Damit hängt über den Zementleimbedarf die für eine gewünschte Betonkonsistenz erforderliche Wassermenge von der Menge und Zusammensetzung des Betonzuschlags ab. Diese Wassermenge bezeichnet man als Wasseranspruch des Zuschlags, der von der gesamten spezifischen Oberfläche der zu umhüllenden Körner abhängt [3, 4, 7, 8 und 9].

##### b) Wahl des Größtkorns

Die auf die jeweilige Anwendung angepaßte Zusammensetzung des Kornaufbaus der Betonzuschläge ist ein wesentlicher Schritt beim Entwurf einer Betonmischung. Die Kornzusammensetzung erfolgt mit den Kornfraktionen, deren Sieblinien festgestellt werden müssen.

Das Größtkorn ist nach mehreren Gesichtspunkten festzulegen: Es soll nicht größer als  $\frac{1}{3}$  der kleinsten Bauteilabmessung sein. Bei engliegender Bewehrung und/oder geringer Betondeckung soll der überwiegende Teil der Zuschlagkörner kleiner als der kleinste lichte Stababstand bzw. als die Betondeckung sein. Des weiteren soll das Größtkorn – noch gute Verarbeitbarkeit und Verdichtbarkeit des Frischbetons vorausgesetzt – möglichst groß gewählt werden, da sich damit bei klein werdender Zuschlagsoberfläche auch der Zementleimbedarf ermäßigt.

Das übliche Größtkorn im Stahlbeton- und Spannbetonbau beträgt rd. 32 mm. Für dickere Bauteile geringer Bewehrungsdichte kann ein Größtkorn von max. 63 mm gewählt werden, während man sich für feingliedrige und hochbewehrte Bauteile meist mit 16 mm begnügt. Für Mass beton wird ein Größtkorn von 100 bis 150 mm gewählt.

##### c) Spezifische Oberfläche und Wasseranspruch

Die Kornzusammensetzung eines Zuschlaggemisches wird durch Siebung mit einem Prüfsiebsatz bestimmt. Das Ergebnis wird als Sieblinie aufgetragen; Bild 5.7.2 zeigt dies für ein Gemisch mit Größtkorn 16 mm. Die Zahlen an der Sieblinie geben an, wieviel M.-% der Gesamtmasse das

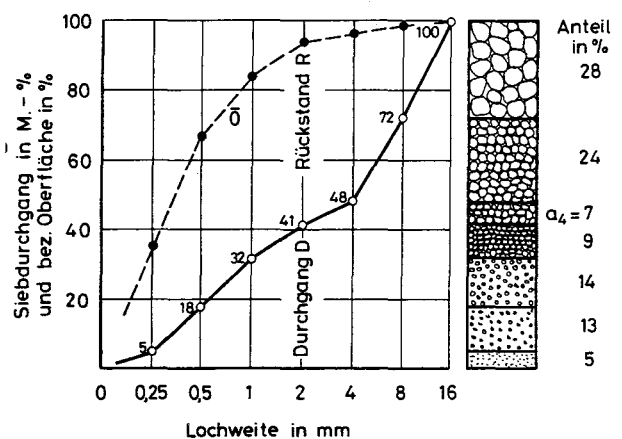


Bild 5.7.2 Sieblinie und spezifische Oberfläche

jeweilige Prüfsieb passiert haben. Beispiel: Beim 2 mm-Sieb sind 41% durchgegangen, und ein Rückstand von 59% blieb liegen. Zusätzlich zu den 7 Lochweiten von Bild 5.7.2 enthält der Prüfsatz i. d. R. noch die Lochweiten 31,5 und 63 mm, also 9 Siebe.

Die Ordinatendifferenz benachbarter Lochseiten ist der Kornanteil, z. B. beim Kornanteil 2/4 mm ist  $a_4 = 7$  M.-%. Die Abszisse ist logarithmisch geteilt, wodurch die grafische Entzerrung des Feinbereichs erreicht wird. Wenn sich die Kornrohdichten der einzelnen Korngruppen nicht unterscheiden, so entspricht der Siebdurchgang in M.-% auch dem in Vol.-%. Diese Voraussetzung ist bei Normalzuschlag gegeben, bei Leichtzuschlag jedoch nicht.

Die in Bild 5.7.2 dargestellte Sieblinie ist eine stetige. Fehlt eine Korngruppe, z. B. 1/4 mm, vollständig, so entsteht eine unstetige Sieblinie (Ausfallkörnung; s. Bild 5.7.4). Der Zementleimbedarf wird durch die gesamte spezifische Oberfläche bestimmt. Unter der Voraussetzung der Kugelform der Körner kann man die spezifische Oberfläche errechnen [3]:

$$\text{spez } 0 = \frac{6}{\varrho_k} \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{d_{mi}} \quad [\text{m}^2/\text{kg}]$$

Dabei muß über  $n$  Kornanteile, hier  $a_1$  bis  $a_7$ , summiert werden. Weiter ist  $d_{mi} = \sqrt{d_i \cdot d_{i-1}}$  der mittlere Korndurchmesser innerhalb des Kornanteils. Jeder Kornanteil liefert einen Beitrag zur Oberfläche; in Bild 5.7.2 ist die Summenlinie der Oberfläche aufgetragen, die insgesamt  $2,75 \text{ m}^2/\text{kg}$  für die dargestellte Sieblinie beträgt. Man erkennt, daß vom Zuschlagbereich  $\leq 1 \text{ mm}$  bereits 85% der Oberfläche gestellt werden; er wird also den Wasseranspruch maßgeblich bestimmen.

Für die Betonpraxis ist die Beurteilung eines Zuschlaggemisches über die Größe und Verteilung der spezifischen Oberfläche zu umständlich. Man hat deshalb Zuschlagkennwerte eingeführt, mit denen die Oberfläche und der Wasseranspruch beurteilt werden können [3]. Die gebräuchlichsten Kennwerte sind die Körnungsziffer und die Durchgangssumme.

Die Körnungsziffer  $k$  ist die Summe der Rückstände auf den  $n$  Prüfsieben des Gemisches:

$$k = \sum_{i=1}^n R_i / 100$$

Je kleiner die Körnungsziffer, um so sandreicher ist das Gemisch und um so größer fällt der Wasseranspruch des Zuschlags bzw. der Zementleimbedarf für eine gewählte Konsistenz aus. Der Durchgangswert  $D$  ist die Summe der Siebdurchgänge (9 Siebe)

$$D = \sum_{i=1}^n D_i$$

er hängt mit der Körnungsziffer wie folgt zusammen:

$$D = (n - k) 100$$

Je größer die Durchgangssumme, um so sandreicher ist das Gemisch. Gemische unterschiedlicher Zusammensetzung, aber gleichen Kennwerts, weisen auch etwa den gleichen Wasseranspruch auf.

Als Arbeitshilfe für die Praxis hat man für die drei Konsistenzbereiche Beziehungen zwischen der Körnungsziffer bzw. der Durchgangssumme und der Anmachwassermenge entwickelt, die in Bild 5.7.3 dargestellt sind. Diese Beziehungen sind Anhaltswerte für den Mischungsentwurf; sie beruhen auf den Regelsieblinien von DIN 1045. Die Anmachwassermenge  $W$  ist die Summe aus Zugabewasser und Oberflächenfeuchte der Zuschläge; sie stellt den gesamten Wasseranspruch (Wasseranspruch des Zuschlags + Wasseranspruch des Zements für dessen Erhärtung) dar.

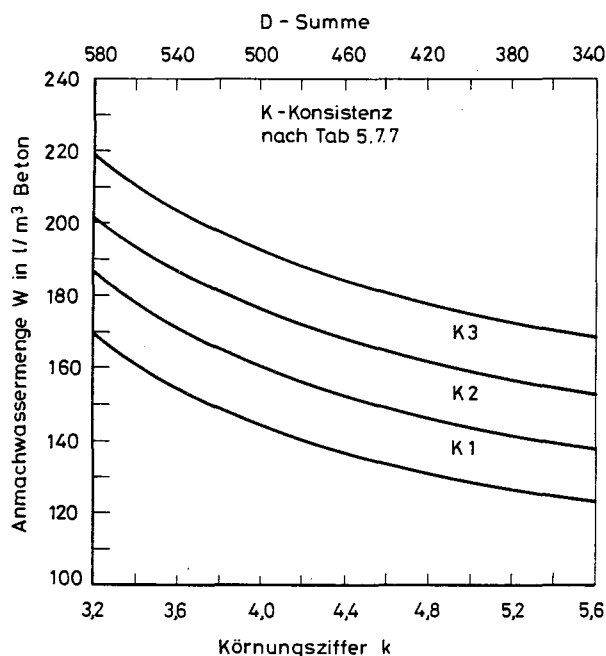


Bild 5.7.3 Anmachwassermenge abhängig von Körnungsziffer und Konsistenz

#### d) Betontechnische Regelsieblinien

In der Praxis liegt der Betonzuschlag in mehreren Fraktionen vor, aus denen dann die Kornzusammensetzung gebildet wird. Da haben sich bei natürlichem Zuschlag mit stetiger Kornverteilung die stetigen Sieblinien bewährt, die sich an der Idealsieblinie, der sogen. Fuller-Parabel, orientieren. Dies lautet:

$$D = 100 \sqrt{d/\max d}$$

mit

$d$  Korndurchmesser  
 $\max d$  Korndurchmesser des Größtkorns  
 $D$  Durchgang von 0 bis  $d$

Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit ist die Vorgabe einer einzigen Idealsieblinie nicht sinnvoll (zeitliche und regionale Schwankungen der Vorkommen). Nach DIN 1045 werden deshalb Sieblinienbereiche vorgegeben, die nach praktischer Erfahrung gewonnen wurden. Bild 5.7.4 zeigt für Zuschlaggemische 0/32 die stetigen Regelsieblinien A, B und C. Die Fuller-Parabel liegt im günstigen Bereich, der bei geringem Wasseranspruch eine gute Verdichtbarkeit sichert. Deshalb ist eine mittlere Lage der gewählten Kornzusammensetzung zwischen A und B anzustreben. Eine



Sieblinie bei und unter A ist schwer zu verdichten, und eine Sieblinie oberhalb C erfordert einen zu hohen Zementleimbedarf. Der Zementleimbedarf bzw. der Wasseranspruch für eine bestimmte Konsistenz steigt in Richtung von A nach C. Bei Fehlen einer oder mehrerer Fraktionen in einem natürlichen Vorkommen ist es durch eine Ausfallkörnung, z. B. U 32, möglich, ein gut verarbeitbares Gemisch aufzubauen. Die Füllkörnung 0/2 füllt zusammen mit dem Zementleim den Hohlraum des Grobkorns 16/32.

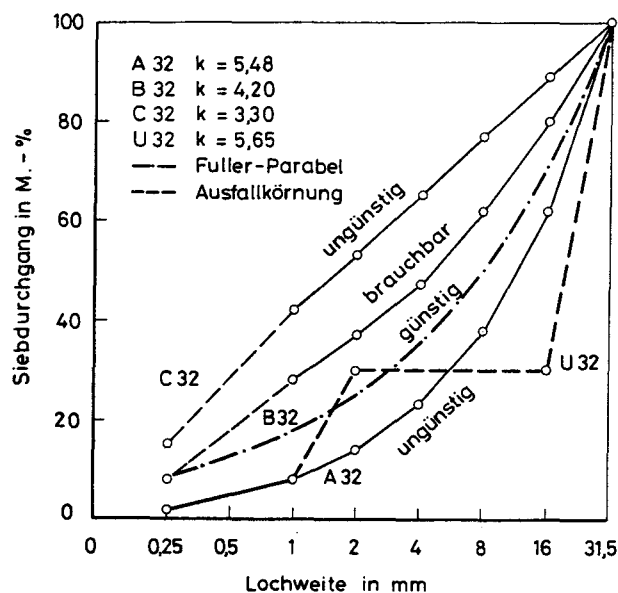


Bild 5.7.4 Sieblinienbereiche nach DIN 1045 für Zuschlagsgemische 0/32

Für eine gute Verarbeitbarkeit und eine hohe Dichtigkeit des Betons ist ein ausreichender Gehalt an Mehlkorn notwendig. Das Mehlkorn besteht aus dem Zement und dem Feinstsand  $\leq 0,25$  mm. Der erforderliche Mehlkorngesamt nimmt mit dem Größtkorndurchmesser ab und beträgt für Zuschlag 0/32 rd.  $400 \text{ kg/m}^3$  Beton (Aufstockung durch mineralische Feinststoffe ist möglich). Die Festlegung einer Kornzusammensetzung aus vorgegebenen Fraktionen, deren Sieblinie z.B. im günstigen

Bereich liegen soll, erfolgt durch Probieren und Korrigieren. Die erforderliche Gesamtmenge des Zuschlags  $m_k$ , wie sie sich aufgrund des Mischungsentwurfs ergibt, muß mit den Sieblinien der Fraktionen zusammengesetzt werden.

### 5.7.3 Eigenschaften des Frischbetons

#### 5.7.3.1 Verarbeitbarkeit

##### a) Anforderungen und Einflußgrößen

Damit eine gewünschte Festbetoneigenschaft (z. B. Druckfestigkeit, Frostwiderstand u. a.) erreicht wird, muß der Frischbeton eine gute Verarbeitbarkeit besitzen. Unter Verarbeitbarkeit versteht man die Summe folgender Eigenschaften:

- Zusammenhaltvermögen (keine Trennung bzw. Entmischung von Zuschlag und Zementleim bei Förderung, Einbau und Verdichtung) und
- Verdichtungswilligkeit des Frischbetons.

Die Verarbeitbarkeit ist über folgende Einflußgrößen steuerbar:

- Kornzusammensetzung des Zuschlagsgemisches
- Anmachwassergehalt des Frischbetons
- Zementmenge
- Betonzusatzmittel, Betonzusatzstoffe.

Die für einen Anwendungsfall notwendige Verarbeitbarkeit richtet sich nach den Einrichtungen zur Förderung, Einbringung und Verdichtung, nach den Bauteilabmessungen und der Bewehrungsdichte sowie nach den Klimabedingungen beim Betonieren.

##### b) Konsistenz

Die Verarbeitbarkeit, als zur vollständigen Verdichtung erforderliche Verdichtungsarbeit deutbar, ist keine physikalisch meßbare Größe. Als Maß der Verarbeitbarkeit hat sich in der Praxis die Konsistenz, die nach in DIN 1048 [N 4] genormten Prüfverfahren bestimmt wird, bewährt. Tab. 5.7.7 zeigt die Konsistenzbereiche (Feinmörtel = Zement + Wasser + Feinzuschlag bis 1 mm).

Tab. 5.7.7 Konsistenzbereiche des Frischbetons nach DIN 1045 sowie Konsistenz von Fließbeton [N 5]

Konsistenzbereich	Eigenschaften des		Verdichtungsmaß $v$	Ausbreitmaß $a$ in cm	Zweckmäßige Verdichtungsart
	Feinmörtels	Frischbetons beim Schütten			
K1 steifer Beton	etwas nasser als erdfeucht	noch lose	1,45 bis 1,26	–	kräftig wirkende Rüttler und/oder kräftiges Stampfen in dünner Schüttlage
K2 plastischer Beton	weich	schollig bis knapp zusammenhängend	1,25 bis 1,11	$\leq 40$	Rütteln und/oder Stochern und Stampfen
K3 weicher Beton	flüssig	schwach fließend	1,10 bis 1,04	41 bis 50	Stochern und/oder leichtes Rütteln u. ä.
Fließbeton	flüssig	fließend	–	51 bis 60	Stochern oder sehr leichtes Rütteln

Mit dem Verdichtungsmaß kann die Konsistenz für alle Bereiche angegeben werden. Für Fließbeton ist es ungeeignet. Das Verdichtungsmaß wird nach Bild 5.7.5 bestimmt. In einen Blechbehälter wird Beton lose eingefüllt und dann durch Rütteln intensiv verdichtet. Das Verdichtungsmaß ist das Verhältnis der Höhen des Betons vor und nach dem Rütteln. Je größer das Verdichtungsmaß ist, um so steifer ist der Beton und um so mehr Energie muß zu seiner Verdichtung aufgewandt werden.

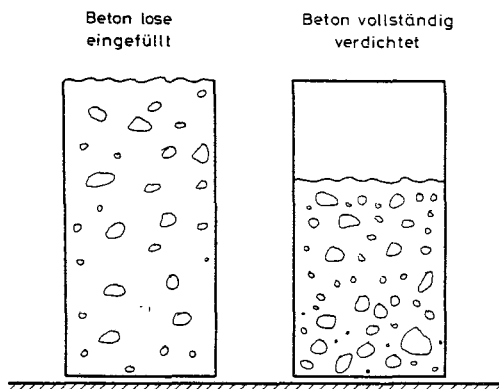


Bild 5.7.5 Bestimmung des Verdichtungsmaßes

Das Ausbreitmaß dient zur Konsistenzbestimmung von plastischem und weichem Beton sowie von Fließbeton. Bild 5.7.6 zeigt den Ausbreittisch, auf den eine Blechkonusform gestellt wird. Diese wird in zwei Lagen mit Beton gefüllt, jede Lage wird durch Stampfen verdichtet. Dann wird die Form gezogen und die Tischplatte 15 mal angehoben und fallengelassen. Dabei breitet sich der Beton aus. Durch das Ausbreitmaß kann das Zusammenhaltevermögen gut beurteilt werden.

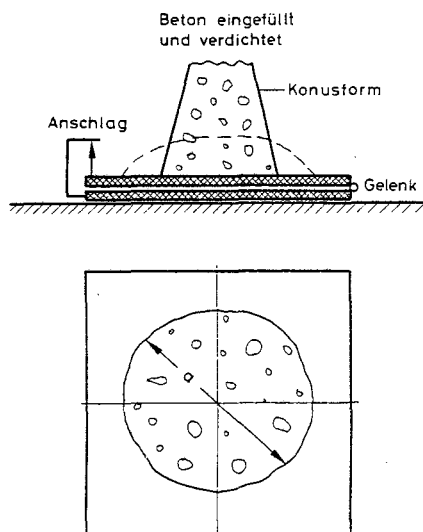


Bild 5.7.6 Bestimmung des Ausbreitmaßes

Die beschriebenen Verfahren sind alternativ anwendbar, aber nicht austauschbar, da zwischen ihnen keine festen Beziehungen bestehen. Das heißt, daß das einmal bei der Eignungsprüfung gewählte Verfahren auch zur Güteprüfung angewandt werden muß. Andere, im Ausland benutzte Verfahren werden in [3] beschrieben.

Die Betonkonsistenz ist eine für den Zeitraum des Förderns, Einbaus und der Verdichtung maßgebende Eigenschaft, die sich im Laufe der Verarbeitungszeit verändert. Infolge hoher Außen- und/oder Frischbetontemperatur steift der Frischbeton infolge Verdunstung von Anmachwasser an. Auch das Wassersaugen poriger Zuschläge und erste chemische Reaktionen der Hydratation führen zum Ansteifen.

### 5.7.3.2 Frischbetonrohichte und Luftgehalt

Die Frischbetonrohichte wird bei der Herstellung der 20-cm-Würfel für die Eignungs-, Güte- oder Erhärtungsprüfung oder bei Messung des Luftgehalts des verdichteten Frischbetons bestimmt. Sie ermöglicht eine grobe Überprüfung der Betonzusammensetzung und der Verdichtung. Wenn die Form ein Volumen  $V$  und ihr verdichteter Betoninhalt die Masse  $m_b$  besitzt, so kann man die Frischbetonrohichte sofort bestimmen:

$$\rho_{br} = \frac{m_b}{V}$$

Sie kann dann der rechnerischen Frischbetonrohichte gegenübergestellt werden, die der Betonrezeptur zugrunde lag [3].

Auch optimal verdichteter Beton enthält noch einen restlichen Luftgehalt von rd. 1 bis 2 Vol.-% ( $\approx 10$  bis  $20 \text{ dm}^3/\text{m}^3$  Frischbeton). Bei Verwendung eines LP-Betonzusatzmittels wird der Luftgehalt bewußt auf z. B. rd. 4 Vol.-% gesteigert (für Beton mit hohem Frost- und Tausalz widerstand). Da ein Überschreiten des erforderlichen Luftgehalts die Druckfestigkeit mindert und ein Unterschreiten nicht den angestrebten Widerstand erzeugt, ist die Kontrolle des Luftgehalts erforderlich. Der Luftgehalt wird üblicherweise nach dem Druckausgleichsverfahren gemessen (s. Bild 5.7.7). Auf den verdichteten Beton wird über ein Wasserpolster ein Luftdruck aufgebracht, der sich entsprechend dem Luftgehalt plus Volumen der Druckkammer einstellt (Basis: Boyle-Mariotte-Gesetz  $pV = \text{const.}$ ).

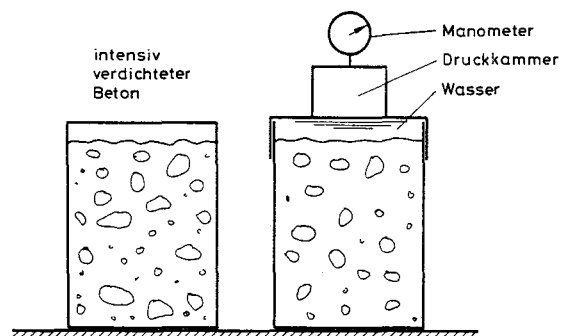


Bild 5.7.7 Bestimmung des Luftgehalts von Frischbeton

### 5.7.3.3 Frischbetontemperatur

Die Frischbetontemperatur beeinflusst im Zusammenhang mit der Außentemperatur, den Bauteilabmessungen u. a. m. den Beginn des Erstarrens und die Entwicklung der Festigkeit. Eine hohe Frischbetontemperatur führt zu einem raschen Ansteifen und damit auch zu einer schlechteren Verarbeitbarkeit. Eine niedrige Frischbetontemperatur ver-

zögert das Ansteifen und das Erhärten. Insbesondere im Hochsommer und bei kühler Witterung muß die Frischbetontemperatur angepaßt und kontrolliert werden. Sie hängt ab von:

- der Betonzusammensetzung und von
- den Temperaturen der Ausgangsstoffe und deren Stoffwärme  $c$ .

Mit den Einzelmassen in kg pro cbm Beton, den Stoffwärmen und Einzeltemperaturen

Z Zementgehalt;  $c_Z = 0,85 \text{ kJ/kgK}$ ;  $\vartheta_Z$

W Anmachwassergehalt;  $c_W = 4,19 \text{ kJ/kgK}$ ;  $\vartheta_W$

G Zuschlaggehalt;  $c_G = 0,85 \text{ kJ/kgK}$ ;  $\vartheta_G$

beträgt die Frischbetontemperatur nach dem Mischen

$$\vartheta_{bf} = \frac{Z \vartheta_Z c_Z + W \vartheta_W c_W + G \vartheta_G c_G}{Z c_Z + W c_W + G c_G}$$

Sie wird in erster Linie von den Zuschlägen und dem Anmachwasser bestimmt oder über diese Komponenten beeinflussbar.

#### 5.7.3.4 Entmischungsneigung

Unter Entmischen versteht man den Verlust des Zusammenhalts des Frischbetons während des Förderns, Einbaus und Verdichtens, wodurch ein inhomogenes Betongefüge entsteht. Die Neigung zum Entmischen wird durch folgende Einflüsse hervorgerufen oder begünstigt:

- Frischbeton mit einem zu geringen Anteil an Feinststoffen und Zementleim (magerer, zuschlagreicher Beton) neigt zu einer Abtrennung der groben Zuschläge, insbesondere bei fehlerhaftem Einbau, der z. B. bei zu hohem und ungeführtem Absturz des Betons beim Einfüllen in die Schalung vorliegt. Auch ein zu dünnflüssiger Zementleim führt zur Entmischung.
- Das Bluten des Frischbetons ist eine Form der Entmischung, die beim Fördern, Verdichten und noch nach dem Verdichten auftritt. Das Bluten ist eine Sedimentation, bei der sich der schwerere Zuschlag absetzt und der leichtere Zementleim nach oben steigt. Das Bluten wird durch einen zu geringen Feinststoffgehalt und durch einen zu dünnflüssigen Zementleim (hoher W/Z-Wert) gefördert.

Die unter a) beschriebene Entmischungsneigung ist eher bei steifem K1-Beton anzutreffen und zeigt sich durch mangelhaftes Zusammenhaltevermögen im Ausbreitversuch an. Die Neigung zum Bluten erkennt man im Verdichtungsversuch, indem sich nach Verdichtung ein geschlossener Spiegel einer wässrigen Schlämpe einstellt.

Die Folgen des Entmischens sind vielfältig. Durch das Bluten entsteht eine ungleichmäßige Festigkeit über die Bauteilhöhe. Die Oberflächenbereiche plattenförmiger Bauteile zeigen eine Anreicherung von Zementleim hohen W/Z-Werts. Bei geringerer Festigkeit steigt die Schwindrißgefahr; Dauerhaftigkeit und Abriebwiderstand nehmen ab. Wasserlinsen unter Grobkörnern und Bewehrungsstäben vermindern den Verbund (s. Bild 5.7.8).

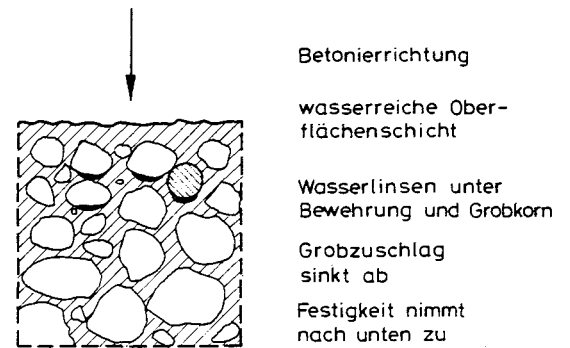


Bild 5.7.8 Folgen des Blutens

### 5.7.4 Betonzusammensetzung

#### 5.7.4.1 Ziele

Der Mischungsentwurf beinhaltet das Wählen von Ausgangsstoffen und deren Mengen, damit unter baupraktischen Bedingungen der Herstellung und Verarbeitung bestimmte Betoneigenschaften zielsicher erreicht und eingehalten werden. Die verfolgten Ziele betreffen die Frisch- und Festbetoneigenschaften, die mit einem Kostenminimum einzuhalten sind.

Der Frischbeton muß so zusammengesetzt sein, daß er mit den gegebenen Verfahren und Geräten optimal gefördert, verarbeitet und verdichtet werden kann. Die Anforderungen an den Festbeton richten sich nach den Vorgaben für die Festigkeit, Dauerhaftigkeit und anderen Gebrauchseigenschaften.

#### 5.7.4.2 Anforderungen an Beton, nach DIN 1045

Die DIN 1045 regelt die Zusammensetzung von und die Anforderungen an Normalbeton. Hiernach wird nach Beton bestimmter Druckfestigkeit und nach Beton mit besonderen Eigenschaften unterschieden, wobei häufig mehrere Eigenschaften gleichzeitig erfüllt werden müssen und diese auch untereinander abhängig sind.

Die Herstellung von Beton unterliegt zahlreichen Schwankungen, die sich als Streuung der Werkstoffeigenschaften äußern. Das der Bemessung von Bauteilen zugrundeliegende Sicherheitskonzept erfordert sowohl die Kenntnis als auch die Kontrolle dieser Eigenschaftsschwankungen. Der Erfüllung dieser Anforderungen dient die Güteüberwachung, deren Art und Umfang sich nach der zu erzielenden Güte richten muß [N 6].

Tab. 5.7.8 zeigt die Unterteilung der Betone von DIN 1045 nach Betongruppen und Festigkeitsklassen. Zur Betongruppe BI gehören die niedrig- bis mittelfesten Betone B5 bis B25 und zur Betongruppe BII die höher- bis hochfesten Betone B35 bis B55. Erwartungsgemäß erfordern Betone BII einen höheren Aufwand an Überwachung.

Die Festigkeitsklasse wird durch zwei Vorgaben charakterisiert, die beide eingehalten sein müssen: Nenn- und Serienfestigkeit. Wegen der Streuung der Ergebnisse muß

Tab. 5.7.8 Festigkeitsklassen für Normalbeton

Betongruppe	Festigkeitsklasse des Betons	Nennfestigkeit <sup>1</sup> $\beta_{WN}$ Mindestwert jedes Würfels	Serienfestigkeit <sup>1</sup> $\beta_{WS}$ Mindestwert der mittleren Druckfestigkeit	Anwendung
		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
BI	B5	5	8	nur für unbewehrten Beton
	B10	10	15	
	B15	15	20	für unbewehrten
	B25	25	30	
BII	B35	35	40	und für bewehrten Beton
	B45	45	50	
	B55	55	55	

1 an mindestens 3 Würfeln mit 20 cm Kantenlänge im Alter von 28 d nach Normlagerung bestimmt

die Druckfestigkeitsprüfung für eine Betonherstellung an mindestens 3 Würfeln vorgenommen werden. Der niedrigste Einzelwert darf nicht unter der Nennfestigkeit, der Mittelwert nicht unter der Serienfestigkeit liegen. Durch diese Vorgaben wird zum einen den Streuungen Rechnung getragen und zum anderen Einfluß auf die Betonherstellung genommen, wie im folgenden erläutert wird.

Die Druckfestigkeit ist eine streuende Eigenschaft. Es wäre demnach falsch, der Bemessung die mittlere Festigkeit zugrunde zu legen. Vielmehr ist von einer charakteristischen Festigkeit auszugehen, die von der Gesamtheit der Druckfestigkeiten im Bauteil in nur wenigen Fällen unterschritten wird. Die Nennfestigkeit ist diese charakteristische Festigkeit; sie stellt den 5%-Fraktilenwert der Grundgesamtheit dar, nur 5% aller Werte liegen unter ihr. Zwischen Mittelwert und 5%-Fraktile gilt der Zusammenhang

$$\beta_{5\%} = \beta_m - 1,64 s,$$

wobei  $s$  die Streuung ist. Auswertungen haben gezeigt, daß die Streuung bei sorgfältiger Betonherstellung i. M. 3 N/mm<sup>2</sup> beträgt und i. w. unabhängig von der Festigkeit ist. Damit wird es möglich, durch Vorgabe des Mittelwerts bzw. der Differenz

$$\beta_m - \beta_{5\%} = 1,64 s \cong 5 \text{ N/mm}^2$$

die Gleichmäßigkeit der Betonherstellung zu beschreiben und zu erzwingen.

Nach DIN 1045 und nach der Güteüberwachungsnorm DIN 1084 [N 6] werden Prüfungen zum Nachweis der Eignung, Güte und des Erhärtungszustands erforderlich. Mit der Eignungsprüfung wird zeitlich vor dem Betonieren überprüft, ob sich mit dem gewählten Mischungsentwurf die angestrebten Eigenschaften des Frisch- und Festbetons realisieren lassen. Die Güteprüfung ist während der Bauausführung durchzuführen; durch sie soll der Nachweis über die Einhaltung der Eigenschaften erbracht werden. Durch die Erhärtungsprüfung soll der Erhärtungszustand des Betons unter den Erhärtungsbedingungen des Bauteils überprüft werden, z. B. zur Festlegung der Ausschallfrist.

#### Beton BI

Die Betongruppe BI umfaßt die Festigkeitsklassen B5 bis B25. Bei Einhaltung eines Mindestzementgehalts kann der Beton ohne vorherige Eignungsprüfung nach bewährten Rezepten zusammengesetzt werden (Rezeptbeton, Betonrezepte siehe in [7]). Der Mindestzementgehalt richtet sich i. w. nach dem Sieblinienbereich und der Konsistenz. Will man den Zementgehalt vermindern, so wird eine Eignungsprüfung erforderlich. Wegen des Korrosionsschutzes der Bewehrung muß min  $Z \geq 240 \text{ kg/m}^2$  bei Zementen Z35 und höher bzw. min  $Z \geq 280 \text{ kg/m}^2$  bei Zement Z25 erfüllt sein. Näheres siehe in [N 1] und [7].

#### Beton BII

Zu diesen Betongruppen gehören die Festigkeitsklassen B35 und höher. Es wird nicht nur stets eine Eignungsprüfung, sondern auch ein erhöhter Aufwand für die Güteüberwachung erforderlich. Bezüglich Umfang und Art der Prüfungen siehe [N 6] und [7].

#### Betone mit besonderen Eigenschaften

Bei besonderen Beanspruchungen steht die Druckfestigkeit als Auslegungsziel für die Betonzusammensetzung nicht mehr im Vordergrund. Tab. 5.7.9 zeigt Regeln für einige Betone mit besonderen Eigenschaften, die i. d. R. BII-Betone sind, unter bestimmten Bedingungen aber auch als BI-Betone hergestellt werden dürfen.

#### 5.7.4.3 Wasserzementwert-Regel

Die Druckfestigkeit der Normalzuschläge liegt stets über 100 N/mm<sup>2</sup>. Damit wird die Druckfestigkeit von Normalbeton nur von der des Zementsteins bestimmt, die wie in Abschn. 5.6 erläutert, vom Wasserzementwert abhängt. Bild 5.7.9 zeigt den empirischen Zusammenhang zwischen der mittleren Betondruckfestigkeit und dem W/Z-Wert für die Festigkeitsklassen von Zement nach DIN 1164 als Parameter im Alter von 28 Tagen [9]. Bei der Aufstellung der Kurven wurde von der Erfahrung ausgegangen, daß die mittlere

Tab. 5.7.9 Betone mit besonderen Eigenschaften

Besondere Betoneigenschaft	max. W/Z-Wert	Wassereindringtiefe cm	Luftgehalt Vol.-%	Weitere Anforderungen
wasserundurchläss. Beton	bei $d \leq 40$ cm $w \leq 0,60$ bei $d > 40$ cm $w \leq 0,70$	$\leq 5$	–	als BI mit $Z \geq 350 \text{ kg/m}^3$ bei 0/32 zwischen A/B; ab B35 als BII; ausreichender Mehlg Korngehalt
Beton mit hohem Frostwiderstand	$w \leq 0,60$ bei mass. Bauten $w \leq 0,7$	$\leq 5$	ohne LP-Mittel  $\geq 3,5$ bei $d_k = 32 \text{ mm}$	wasserundurchl. Beton mit frostbeständigem Zuschlag
Beton mit hohem Frost- u. Tausalz widerstand	$w \leq 0,60$	$\leq 5$	$\geq 3,5$ bei $d_k = 32 \text{ mm}$	wasserundurchl. Beton mit frostbeständigem Zuschlag
Beton mit hohem Widerstand gegen chem. Angriffe	schwacher Angriff $w \leq 0,60$ starker Angriff $w \leq 0,50$ sehr starker Angriff $w \leq 0,5$	$\leq 5,0$ $\leq 3,0$ $\leq 3,0$	–	stets wasserundurchl. Beton; HS-Zement bei starkem Sulfatangriff
				bei längerer Angriffsdauer Schutz erforderlich
Beton mit ausreichendem Widerstand gegen Hitze	–	–	–	Kalksteinzuschlag oder Hochofenschlacke
Beton mit hohem Abnutzwiderstand	–	–	–	B35 und besser; bei 0/32 bei $A_{32}$ und $Z \leq 350 \text{ kg/m}^3$ verschleißfeste Zuschläge
Unterwasserbeton	$\leq 0,60$	–	–	bei 0/32 zwischen A/B $Z \geq 350 \text{ kg/m}^3$ ; $a = 45 - 50 \text{ cm}$

Normdruckfestigkeit  $N_{28}$  des Zements um rd.  $10 \text{ N/mm}^2$  über der Nennfestigkeit liegt. Wenn man die tatsächliche Normdruckfestigkeit kennt, so kann man zwischen den Linien interpolieren.

Mit zunehmendem W/Z-Wert nimmt die Betondruckfestigkeit ab. Da ab  $W/Z < 0,5$  der Kapillarporenraum im Zementstein verschwindet, würde man für kleine W/Z-Werte einen stärkeren Anstieg der Betondruckfestigkeit erwarten. Das leichte Abkrümmen ist darauf zurückzuführen, daß ab  $W/Z < 0,5$  die vollständige Verdichtung immer schwerer fällt.

#### 5.7.4.4 Mischungsentwurf

Der Entwurf einer Betonmischung ist eine Ingenieuraufgabe, die auf Basis von Erfahrungen und mit Arbeitshilfen durch Probieren und Korrigieren zu lösen ist. Folgende Faktoren beeinflussen die Wahl der Stoffe und die Zusammensetzung:

##### – Geforderte Festigkeitsklasse

Aufgrund der Bemessung des Bauteils wird eine bestimmte Festigkeitsklasse, z. B. B35, gefordert. Die Wahl der Festigkeitsklasse des Zements richtet sich i. w. nach der Betonfestigkeitsklasse. Darüber hinaus wird die Wahl des Zements auch noch nach anderen Gesichtspunkten getroffen: Frühhochfestigkeit, Abbindewärme usw., siehe Abschn. 5.6.

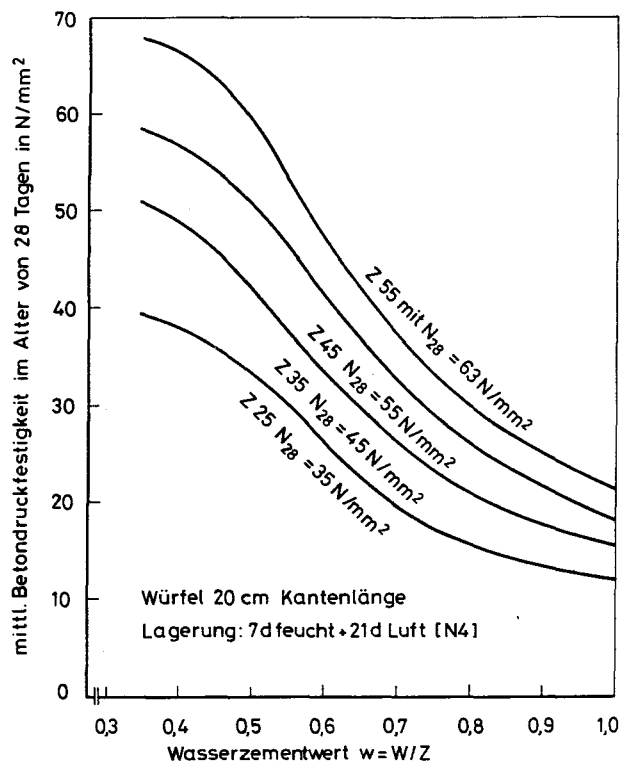


Bild 5.7.9 Betondruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen abhängig vom W/Z-Wert und Zementfestigkeit

#### – Verfahren zur Förderung und Verdichtung

Sie bestimmen die erforderliche Betonkonsistenz, den Wasseranspruch und schließlich auch den Zementgehalt u.a.m.

#### – Bauteil und Bewehrung

Die Abmessungen des Bauteils und die Bewehrungsdichte beeinflussen die Kornzusammensetzung, das Größtkorn, die Konsistenz und spielen außerdem bei der Wahl von Art und Menge des Zements und des Mehlkorns eine Rolle.

#### – Klimabedingungen

Das Klima beim und nach dem Betonieren übt einen Einfluß auf die Wahl z. B. der Zementart, der Konsistenz, der Beton-zusatzmittel aus. Der Mischungsentwurf erfolgt i.d.R. mit der Stoffraumrechnung für  $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ dm}^3$  verdichteten Frischbetons. Die Grundgleichung der Stoffraumrechnung lautet:

$$1000 \text{ dm}^3 = \frac{Z}{\rho_z} + \frac{W}{\rho_w} + \frac{G}{\rho_k} + V_p$$

Hierin bedeuten:

$Z, \rho_z$	Zementgehalt in kg; Zementreindichte in $\text{kg/dm}^3$
$W, \rho_w$	Anmachwassergehalt in kg; $\rho_w = 1 \text{ kg/dm}^3$
$G, \rho_k$	Zuschlagmenge in kg, Kornrohichte in $\text{kg/dm}^3$
$V_p$	Restporenraum in $\text{dm}^3$

Für eine vorgegebene Betonfestigkeitsklasse und nach Wahl der Stoffe (Zementart, Zuschlagart, Größtkorn, Sieblinie usw.) sowie der Konsistenz sind folgende Schritte erforderlich, die am Beispiel eines B35 der Konsistenz K2 vorgeführt werden:

##### 1. Bestimmung der Anmachwassermenge

Für eine gewählte Kornzusammensetzung (Sieblinie) kann die Anmachwassermenge  $W$  für die ebenfalls gewählte Konsistenz mit Hilfe der Körnungsziffer  $k$  nach Bild 5.7.3 geschätzt werden.

Beispiel:

Sieblinie B32,  $k = 4,20$  und K2  $\rightarrow W \approx 165 \text{ l/m}^3$ . Die Zugabewassermenge ergibt sich nach Abzug der Oberflächenfeuchte des Zuschlags. Die Reduktion des Wassergehalts durch verflüssigende Betonzusatzmittel muß durch Probieren festgestellt werden.

##### 2. Bestimmung des W/Z-Werts

Die mittlere Betondruckfestigkeit nach 28 Tagen muß die Serienfestigkeit zuzüglich eines Vorhaltemaßes  $\Delta\beta_w$  sein, womit spätere Schwankungen des W/Z-Werts berücksichtigt werden.

Beispiel:

B35;  $\beta_{wN} = 35 \text{ N/mm}^2$  und  $\beta_{wS} = 40 \text{ N/mm}^2 \rightarrow$   
 $\text{erf } \beta_{wM} = \beta_{wS} + \Delta\beta_w = 40 + 2 = 42 \text{ N/mm}^2$ .  
Mit einem Z35 ist aus Bild 5.7.9 zu ersehen:  
 $w = 0,5$

##### 3. Bestimmung des Zementgehalts

Nun ist wegen

$$w = \frac{W}{Z}$$

$$Z = W/w \geq \min Z \text{ für Korrosionsschutz}$$

Beispiel:

$$Z = 165/0,5 = 330 \text{ kg/m}^3 > 280 \text{ kg/m}^3; \text{ s. 5.7.4.2 [N 1]}$$

##### 4. Schätzung des Porenraums

Auch bei optimaler Verdichtung verbleibt ein restlicher Porenraum, der i. M.  $15 \text{ dm}^3$  beträgt. Er wird bei Einführung künstlicher Luftporen vergrößert.

##### 5. Bestimmung der Zuschlagmenge

Wir erhalten aus der Stoffraumgleichung:

$$G = \left(1000 - \frac{Z}{\rho_z} - W - V_p\right) \cdot \rho_k$$

wobei  $\rho_k$  mit Tab. 5.7.4 gewählt wird.

Beispiel:

$$G = \left(1000 - \frac{330}{3,0} - \frac{165}{1,0} - 15\right) 2,65 = 1882 \text{ kg/m}^3$$

##### 6. Bestimmung des Mischungsverhältnisses

Das Mischungsverhältnis in Gewichtsteilen ist zur Bestimmung von Teilmengen von  $1 \text{ m}^3$  Beton und zur Berechnung der Mischerfüllung notwendig. Es lautet:

$$Z : W : G = 1 : w : \frac{G}{Z} \text{ nach GT}$$

Beispiel:

$$Z : W : G = 1 : 0,5 : 5,7 \text{ nach GT}$$

Nachdem die Baustoffmengen festgelegt sind, kann man eine Probemischung herstellen und deren Konsistenz prüfen. Erweist sich der Beton als zu steif, um mit dem gewählten Verdichtungsgerät vollständig verdichtet werden zu können, so müssen bei festem W/Z-Wert sowohl der Zement- als auch der Wassergehalt angehoben werden.

### 5.7.5 Herstellen, Verarbeiten und Nachbehandeln

#### 5.7.5.1 Betonherstellung

Die Ausgangsstoffe werden entsprechend Betonrezeptur i.d.R. nach Gewicht abgemessen und im Betonmischer innig durchmischt. Die Mischdauer nach Zugabe aller Komponenten beträgt im allg. 1 Minute; sie richtet sich nach der Betonzusammensetzung. Das Mischen von Hand ist nur für niederwertige Betone B5 und B10 und nur bei geringen Betonmengen erlaubt.

#### 5.7.5.2 Fördern

Unter Fördern ist der Transport des Frischbetons auf der Baustelle selbst zu verstehen und zwar ab Baustellenmischer oder ab Transportbetonfahrzeug bis hin zur Schalung. Das hierfür gewählte Gerät muß auf die Konsistenz abge-

stimmt sein und die entmischungsfreie Förderung erlauben. Das Fördern erfolgt meist durch Gefäße, die vom Kran verho-ben werden (Betonkübel) oder durch Pumpen (Pumpbe-ton [7]).

Die Herstellung von Baustellenbeton wird aus Gründen der Wirtschaftlichkeit zunehmend von Transportbeton [7] verdrängt. Transportbeton wird im Betonwerk zusammenge-setzt und entweder dort oder im Mischfahrzeug gemischt. Während des Beförderns muß der Beton ständig gerührt oder auf der Baustelle nochmals innig durchmischt werden. Steifer Beton K1 kann auch in Muldenkippern befördert werden.

#### 5.7.5.3 Einbau des Frischbetons

Der Frischbeton wird in die Schalung eingefüllt, die maßhal-tig steif, dicht, sauber, eisfrei und wenig wassersaugend sein muß. Der Einbau muß so erfolgen, daß ein Entmischen nicht stattfindet. Deshalb darf der Frischbeton nicht mehr als 1 m frei fallen, anderenfalls ist er durch ein Fallrohr einzu-bringen. Bei lagenweisem Einbau soll die Schichthöhe 0,5 m nicht überschreiten.

#### 5.7.5.4 Verdichtung

Die möglichst vollständige Verdichtung des Frischbetons ist eine wesentliche Voraussetzung für das Erreichen der angestrebten Gebrauchseigenschaften des Festbetons. Verdichtungsart und -gerät richten sich nach der Betonkon-sistenz, siehe Tab. 5.7.7). Weiche Betone K3 und Fließbe-ton erfordern eine geringe Verdichtungsarbeit und können durch Stochern verdichtet werden. Die Verdichtung durch Stampfen ist nur bei der Konsistenz K1 möglich; sie ist auch dann nur für untergeordnete Betonteile anzuwenden. Steife bis plastische Betone K1 bis K2 werden durch Rütteln ver-dichtet. Hierbei werden vom Rüttler Schwingungen auf den Beton übertragen, der sich dabei verflüssigt und das Entwei-chen von Luft erlaubt [15]. Der Rüttler ist eine Biege-welle mit exzentrischer Masse, die, entweder elektrisch oder pneumatisch angetrieben, um ihre Achse rotiert (Exzenter). Folgende Geräte werden verwendet: Innenrüttler, Scha-lungs- und Oberflächenrüttler. Der Innenrüttler wird in bestimmten Abständen (zylinderförmige Wirkungszone) zü-gig in den Frischbeton eingetaucht und langsam gezo-gen. Schalungsrüttler werden auf die Seitenschalungen dün-ner Wände und Träger montiert und regen den Beton über die Schalung an. Oberflächenrüttler (Rüttelbohlen, -platten) werden für ebene Bauteile angewandt. Da sich weicher bis plastischer Beton noch nach dem Verdichten setzt, kann eine weitere Gütesteigerung durch Nachver-dichtung im Alter von 2 bis 5 Stunden erzielt werden. Neben dem Rütteln gibt es noch einige weitere Verdichtungsver-fahren, die v. a. für Betonwaren und Rohre angewandt wer-den (siehe in [3]).

#### 5.7.5.5 Nachbehandlung und Schutz

Unmittelbar nach Verdichtung muß der junge Beton eine angemessene Zeit vor solchen äußeren Einflüssen (Klima, Erschütterungen u. a. m.) geschützt werden, die sich auf die Erhärtung nachteilig auswirken oder zu frühen Rissen

infolge von Schwinden und Temperaturunterschieden füh-ren. Zu den Maßnahmen gehören die Nachbehandlung und der Schutz bei ungünstiger Witterung.

Die wesentliche Aufgabe der Nachbehandlung ist der Schutz vor Austrocknung v. a. der oberflächennahen Berei-che des Bauteils, da hierdurch eine mangelhafte Festigkeit und Dichtigkeit entsteht. Die Art und Dauer der Nachbe-handlung hängt von den Klimabedingungen, den Betonab-messungen u. a. m. ab [1]. Bild 5.7.10 zeigt, daß die Aus-trocknung mit steigender Temperatur, Sonnenstrahlung und Windgeschwindigkeit ansteigt bzw. mit zunehmender rel. Luftfeuchte abnimmt. Dementsprechend werden fol-gende Maßnahmen gewählt:

- Abdecken durch Folien, Tücher etc. ohne oder mit Feuch-tezufuhr
- Aufsprühen von verdunstungshemmenden, wachsarti-gen Nachbehandlungsfilmen
- Verlängerung der Entschalfristen.

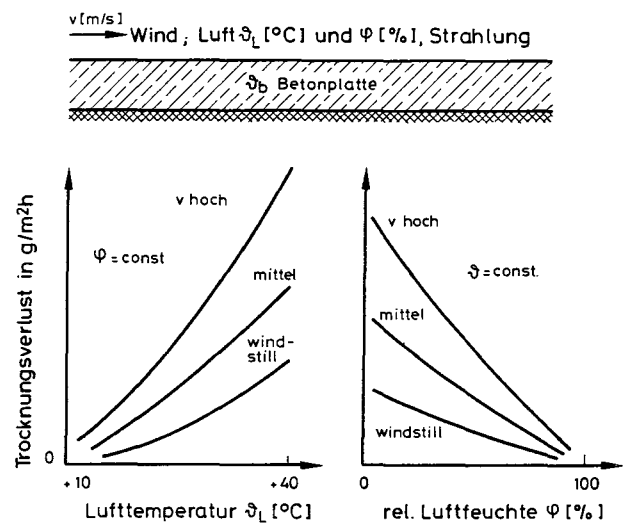


Bild 5.7.10 Austrocknung und deren Einflußgrößen

Die Dauer der Nachbehandlung sollte mindestens 7, besser 14 Tage betragen. Wird ein Bauteil im späteren Betrieb besonderen Beanspruchungen ausgesetzt sein, z. B. che-mischen Angriff, so ist besondere Sorgfalt nötig. Dünnglied-rige Bauteile trocknen rascher aus als dicke und müssen deshalb intensiv nachbehandelt werden. Die Zufuhr von Feuchte durch Berieseln etc. ist besonders bei zementrei-chen Betonen mit niedrigem Wasserzementwert  $\leq 0,5$  not-wendig, da bei diesen sonst ein Selbst austrocknen stattfin-det [1].

Den Einfluß der Dauer einer feuchten Nachbehandlung auf die Festigkeitsentwicklung zeigt Bild 5.7.11. Man erkennt, daß eine vollständige Hydratation  $m = 1$  nur bei dauernder Feuchtlagerung erreicht wird. Der Hydratationsgrad nimmt mit der Dauer der Nachbehandlung zu. Frische Betonober-flächen sind auch vor Niederschlag zu schützen. Erschütte-rungen des frisch betonierten Bauteils sind zu vermeiden, da eine bleibende Entfestigung entstehen kann.

Durch die Nachbehandlung soll auch das Auftreten von Rissen infolge von Frühschwinden und Temperaturunter-schieden verhindert werden. Durch Austrocknung entste-hen in einem Betonbauteil stets Schwindeigenspannungen und zwar als Zug in oberflächennahen Bereichen und als

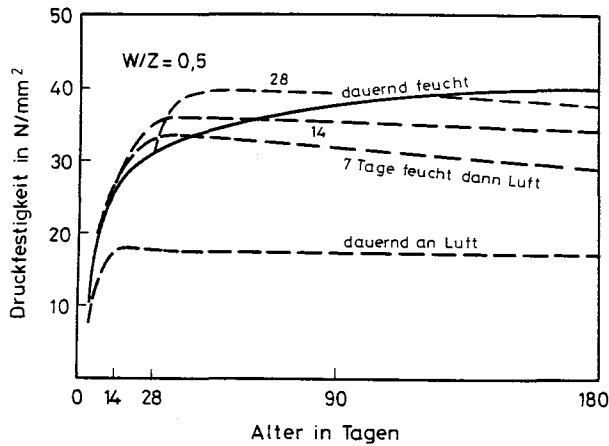


Bild 5.7.11 Einfluß der Dauer der feuchten Nachbehandlung auf die Betondruckfestigkeit (aus [1])

Druck im Inneren. Auch infolge Abkühlung der Abbinde- wärme treten, insbesondere in massigen Bauteilen, Wärme- eigenspannungen auf, die bezüglich Verteilung und Vorzei- chen den Schwindeigenspannungen entsprechen, siehe Bild 5.7.12. Wird außerdem die Kontraktion des Bauteils infolge Schwindens und Abkühlung durch anschließende Bauteile verhindert, so entstehen noch Zwangsspannungen, die sich den Eigenspannungen überlagern (s. Abschn. 4.1). Den Schwind- und Wärmespannungen bzw. der Rißgefahr kann durch folgende Maßnahmen begegnet werden:

- Betontechnologische Maßnahmen wie niedriger Zement- gehalt, niedriger W/Z-Wert, Zement geringer Wärmetö- nung, niedriger Mehlkorngesamt;
- Konstruktive und herstelltechnische Maßnahmen wie Anordnung von Fugen und Wahl einer Betonierfolge mit geringem Reißrisiko;
- Nachbehandlung mit Feuchtezufuhr und ggf. mit künstli- cher Abbinde- wärmeabkühlung.

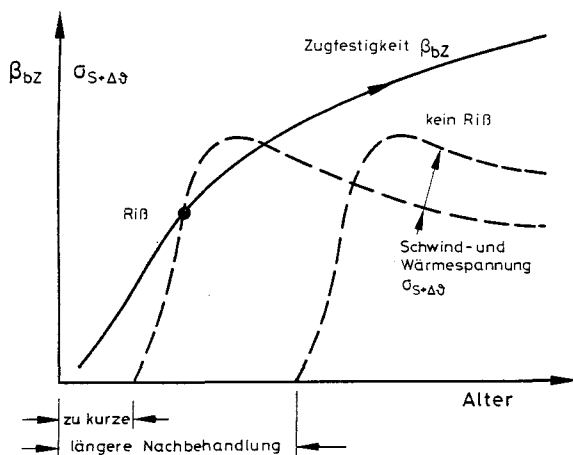


Bild 5.7.12 Entwicklung der Zugfestigkeit und der Spannungen infolge Schwindens und Abkühlung

Junger Beton ist sehr reißgefährdet, weil er wie Bild 5.7.13 zeigt, eine nur niedrige Zugbruchdehnung im frühen Alter zwischen 1 und 3 Tagen aufweist. Erst ab rd. 7 bis 14 Tagen beträgt sie wieder rd. 0,1 bis 0,15‰. Die feuchte Nach- handlung muß so lange währen, daß die sich nach ihrer

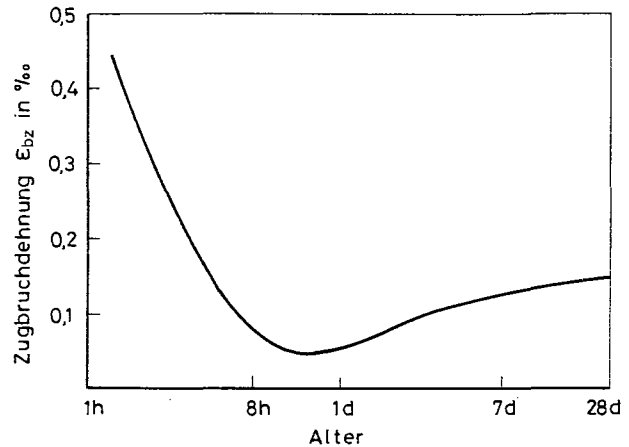


Bild 5.7.13 Zeitliche Entwicklung der Zugbruchdehnung von jun- gem Beton (schematisch aus [17])

Beendigung aufbauenden Spannungen niedriger als die Zugfestigkeit bleiben, siehe Bild 5.7.12.

Tiefe Temperaturen verzögern die Erhärtung. Besonders gefährlich ist das Durchfrieren des grünen, noch nicht aus- reichend festen Betons, da die Eisbildung und Sprengwir- kung zu einer bleibenden Entfestigung führen. Der grüne Beton muß deshalb vor dem ersten Durchfrieren bereits eine Mindestfestigkeit erreicht haben, um gefrierbeständig zu sein. Nach [5] beträgt die Mindestfestigkeit rd. 5 N/mm<sup>2</sup>. Diese wird sicher erreicht, wenn ein Zementgehalt von min- destens 270 kg/m<sup>3</sup> (Z35F, Z45 und Z55) und ein W/Z-Wert ≤ 0,6 gewählt wurden. Außerdem muß der Beton die ersten 3 Tage auf wenigstens + 10 °C gehalten werden. Bei kühler Witterung mit nur geringen Frostgraden > – 3 °C ist die Gefrierbeständigkeit über die Frischbetontemperatur und deren Konstanzhaltung zu erzielen. Massige Bauteile sind weniger gefährdet als dünne. Maßnahmen zur Erzielung der Gefrierbeständigkeit sind:

- Verwendung von frühhochfesten Zementen (Z35F, Z45 und Z55)
- Erhöhung des Zementgehalts
- Verringerung des W/Z-Werts
- Erhöhung der Frischbetontemperatur durch Erwärmen von Wasser und Zuschlag
- Wärmedämmende Schalung bzw. Abdeckung
- Erwärmung des Betons in der Schalung
- Verwendung von erstarrungsbeschleunigenden Beton- zusatzmitteln
- Verlängerung der Ausschallfrist.

## 5.7.6 Festigkeit von Normalbeton

### 5.7.6.1 Bruchmechanismus

Die Festigkeit des Betons hängt von zahlreichen Einflüssen ab. Ungleich zu vielen anderen Baustoffen ist die Festigkeit des Betons keine unveränderliche sondern eine zeitabhän- gige Eigenschaft, die von den Erhärtungsbedingungen abhängt. Festigkeit und Bruchmechanismus werden beim heterogenen Verbundwerkstoff Beton entscheidend von dessen Gefüge bestimmt. Die Koppelung zwischen den



beiden Phasen Körner und Zementstein erfolgt über Verbund.

Der Bruchmechanismus von gedrücktem Beton kann über das Verhalten der Komponenten allein nicht vollständig erklärt werden. In Bild 5.7.14 werden die Spannungs-Dehnungslinien von Zuschlag, Zementstein, Mörtel und Beton miteinander verglichen [18]. Der natürliche Zuschlag ist ideal-elastisch und fester als Beton. Aber auch der Zementstein ist ein im Bereich der Gebrauchsspannungen des Betons i. w. elastischer Stoff. Der Beton hingegen zeigt eine Spannungs-Dehnungslinie, die früh von der des Zuschlags abkrümmt und nach Erreichen des Spannungsmaximums verweicht. Die Erklärung für dieses Verhalten muß in der Heterogenität des Gefüges und deren Folgen gesucht werden [18, 19, 20].

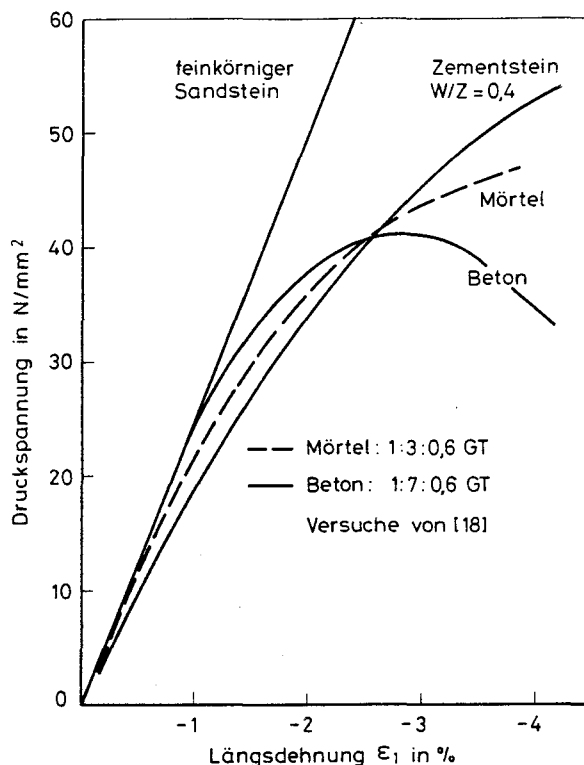


Bild 5.7.14 Spannungs-Dehnungslinien der Betonkomponenten und des Betons

Wie Bild 5.7.15 zeigt, herrscht im Inneren eines Betonkörpers, gegen den eine homogene Druckspannung  $\sigma$  wirkt, eine äußerst heterogene Spannungsverteilung [23]. Weil der E-Modul des Zuschlags den des Zementsteins weit übertrifft, erfolgt eine Konzentration des Drucks in den Polbereichen des Kornes. Gleichzeitig entstehen in den Äquatorbereichen radiale Zugspannungen, die über die Verbundzone (auch als Kontaktzone bezeichnet, s. Bild 5.7.16) hinweg auf den Zuschlag übertragen werden müssen. In [22] wurde gezeigt, daß die Festigkeit des Zementsteins innerhalb der Kontaktzone geringer als in Bereichen außerhalb davon ist, weshalb bereits bei niedrigen Druckspannungen Verbundrisse entstehen. Mit steigender Spannung pflanzen sich die Verbundrisse in der Matrix fort und vereinigen sich im Bruchstadium zu zusammenhängenden Rißflächen, die

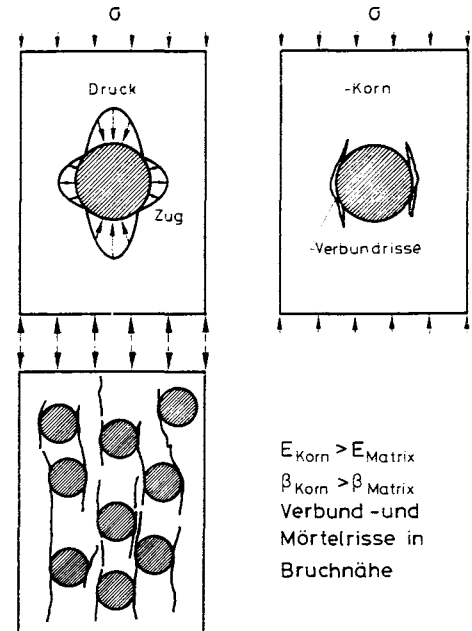


Bild 5.7.15 Mikrorißbildung beim Betondruckbruch

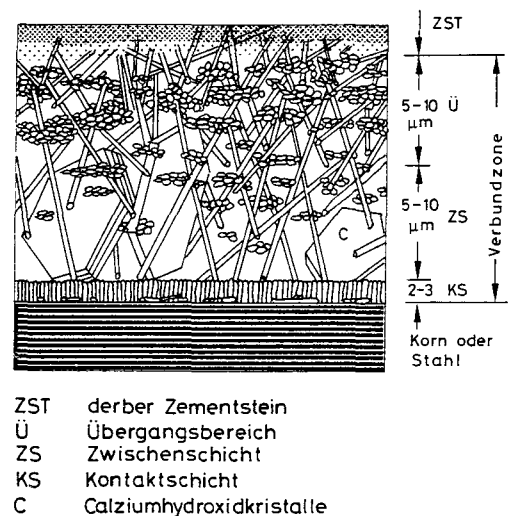


Bild 5.7.16 Verbundzone Zementstein-Zuschlag bzw. -Stahl (schematisch nach [22])

die Körner berühren und parallel zur Druckrichtung verlaufen. Der Druckbruch von Beton ist demnach ein durch die Heterogenität verursachter Zugbruch.

Bei Zugbeanspruchung (s. Bild 5.7.17) kehren sich die inneren Spannungen um. Die Verbundrisse entstehen in den Polen der Körner (Zugspannungen). Während bei Druckbeanspruchung die Rißfortpflanzungsgeschwindigkeit bis in hohe Beanspruchungen hinein gering bleibt, ist sie bei Zug schon deswegen viel größer, weil sich die Zugspannung unmittelbar an der Weitung der Mikrorisse beteiligt. Ausgehend von den Verbundrissen sowie von Schwachstellen im Gefüge wie Poren und Mikrorisse infolge Schwindens entsteht ein sich rasch ausbreitender Bruchriß, der normal zur Lasttrichtung verläuft.

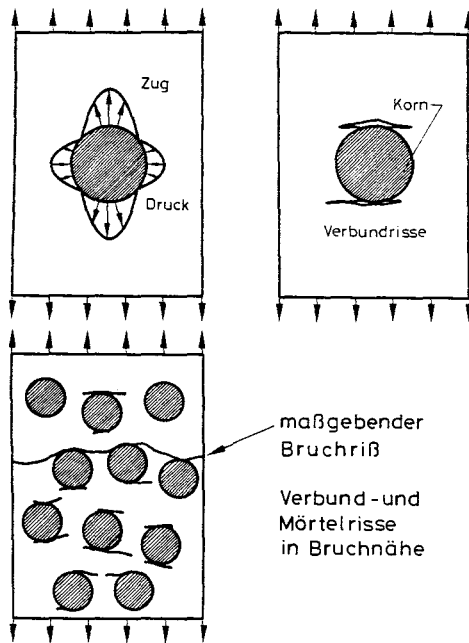


Bild 5.7.17 Mikrorißbildung beim Betonzugbruch

### 5.7.6.2 Festigkeitsprüfung

#### Arten der Prüfung und Probekörper

Gleichgültig, welche der Festigkeitsarten bestimmt wird, einen unmittelbaren Festigkeitswert erhält man nur durch die zerstörende Prüfung. Demgegenüber steht die zerstörungsfreie Prüfung, bei der man über empirische oder physikalische Beziehungen von einem Prüfwert auf die Festigkeit schließt.

Die zerstörende Prüfung der Druckfestigkeit erfolgt an Probekörpern, die man sich – den Grundgedanken der Festigkeitslehre folgend – als hinsichtlich Struktur und Herstellung stellvertretende Ausschnitte aus dem Bauteil vorstellen muß. Damit folgt aus der heterogenen Struktur des Betons, daß die kleinste Probekörperabmessung wenigstens das Drei- bis Fünffache des größten Korndurchmessers sein muß.

Die Herstellung der Probekörper kann entweder gesondert oder durch Entnahme aus dem Bauteil erfolgen. Die gesonderte Herstellung wird für die Eignungs-, Güte- und Erhärtungsprüfung oder für andere Untersuchungen durchgeführt: Würfel von 20 cm und auch von 15 cm Kantenlänge, seltener Zylinder  $h/d = 30/15$  cm. Zur nachträglichen Bestimmung der Druckfestigkeit im Bauwerk werden Bohrkern mit 10 und 15 cm Durchmesser verwendet. In [N 4] sind die Regeln zur Herstellung usw. genormter Prüfkörper angegeben. Bereits jetzt sei darauf hingewiesen, daß Form und Größe des Probekörpers sich im Festigkeitswert äußern, der damit stets eine Mischung physikalischer und technologischer Einflüsse enthält. Aus Gründen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird deshalb die Prüfung üblicherweise an genormten Proben durchgeführt. Aufgrund von Versuchen können die an Proben bestimmter Form, Größe und Schlankheit gewonnenen Festigkeitswerte auf die anderer Probekörper näherungsweise umgerechnet werden.

Die zerstörungsfreie Schätzung der Druckfestigkeit von Bauwerksbeton benutzt andere mechanische Kenngrößen, mit denen mittelbar auf die Festigkeit geschlossen wird. Bei der Schlagprüfung [N 4] wird die Kenngröße über das mechanische Verhalten oberflächennaher Schichten gewonnen. Die DIN 1048 enthält zwei Verfahren: Prüfung mit dem Kugelschlag- und dem Rückprallhammer, s. Bild 5.7.18. Bei der Prüfung mit dem Kugelschlaghammer wird ein Schlagbolzen mit kugelförmiger Endfläche mit definierter Energie auf den Beton geschlagen. Der Durchmesser des Eindrucks ist Maß für die Oberflächenhärte bzw. Festigkeit. Beim Rückprallhammer wird eine Masse mit definierter Energie auf die Oberfläche geschleudert. Der Rückprallweg wird von Härte und Elastizitätsmodul des Betons geprägt und kann der Druckfestigkeit zugeordnet werden.

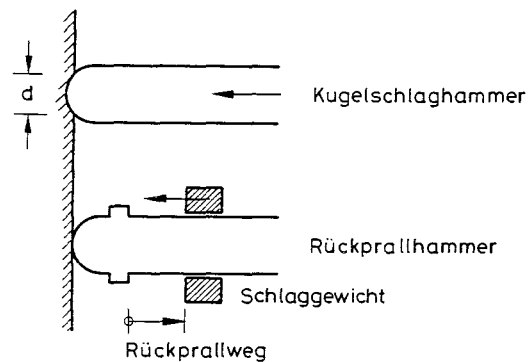


Bild 5.7.18 Schlagprüfung nach DIN 1048

In [3] sind die Möglichkeiten und Grenzen der Schlagprüfung aufgezeigt. Meist kann wegen der Vielzahl der Parameter der Oberflächenschicht nur ein Schätzwert der Festigkeit gewonnen werden, dessen Güte aber zunimmt, wenn man die Betonzusammensetzung und die an Vergleichsbohrkernen bestimmte Festigkeit kennt. Da man müheelos eine Vielzahl von Einzelprüfungen an einem Bauteil durchführen kann, erhält man eine Aussage über die Gleichmäßigkeit der Festigkeit im Bauteil.

Abschließend soll noch das zerstörungsfreie Verfahren der Schallaufzeitmessung erwähnt werden. Weil die Laufzeit eines Impulses (z. B. erzeugt durch einen Hammerschlag) durch ein Bauteil vom E-Modul und von der Rohdichte des Betons abhängt, ist eine Korrelation mit der Festigkeit möglich. Die Güte der Aussage ist aber gering.

Die Prüfung der Zugfestigkeit des Betons erfolgt nur zerstörend. Zur Schätzung der Zugfestigkeit benutzt man deren empirische Beziehung zur Druckfestigkeit, siehe Bild 5.7.21.

#### Arten der Festigkeit

##### a) Druckfestigkeit bei Kurzzeitbelastung

Durch Prüfung der einachsigen Druckfestigkeit an Prismen oder Zylindern wird das Festigkeitsverhalten gedrückter Betonbereiche (z. B. in einer Stütze) nachgebildet, siehe Bild 5.7.19. Die mittlere Spannung beim Bruch im homogenen Spannungsfeld ist die Prismendruckfestigkeit  $\beta_p$ . In erster Näherung ist diese eine wahre Festigkeit. Bei gleicher Schlankheit entspricht  $\beta_p$  auch der Zylinderdruckfestigkeit  $\beta_c$ . Die Würfeldruckfestigkeit  $\beta_w$  ( $d = 20$  cm) übertrifft  $\beta_p$  und  $\beta_c$ .

(siehe Abschn. Prüfeinflüsse) und ist ein technologischer Festigkeitswert. Es gelten folgende Umrechnungsfaktoren [N 4], [7]:

$$\beta_{W20} = 0,95 \beta_{W15} \quad 15 \text{ cm Würfel} \rightarrow 20 \text{ cm Würfel}$$

$$\beta_{W20} = 1,18 \beta_C \quad \text{Zyl. } \varnothing 15/30 \text{ cm} \rightarrow 20 \text{ cm Würfel}$$

In der Biegedruckzone eines Balkens ist die Druckspannung nicht mehr konstant, sondern nichtlinear über die Druckzone verteilt. Durch Prüfung ausmittig beanspruchter Prismen wurde die Tragfähigkeit der Biegedruckzone studiert und mit der einachsigen Prismenfestigkeit  $\beta_P$  in Beziehung gebracht [24]. Tatsächlich liegt aber i. d. R. in der Biegedruckzone eine zweiachsige Beanspruchung vor, die man an quadratischen Scheiben prüft [25]. Der allgemeine Spannungszustand in einem Bauteil ist der dreiachsige, er wird meist an Würfeln untersucht [26]. Die homogene Einleitung der Kräfte über die Endfläche der Probe muß ohne Querdehnungsbehinderung erfolgen [25].

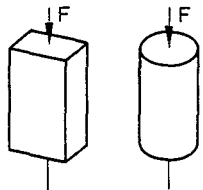
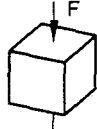
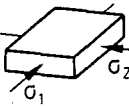
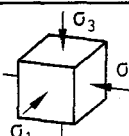
Prismen - und Zylinder - druckfestigkeit		$\beta_P \approx \beta_C = \frac{F_u}{A_b}$
Würfeldruckfestigkeit		$\beta_W = \frac{F_u}{A_b} > \beta_P \text{ und } \beta_C$
zweiachsige Festigkeit		$\beta_1 = f\left(\beta_P, \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \text{ u.a.}\right)$
dreiachsige Festigkeit		$\beta_1 = f\left(\beta_P, \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \text{ u.a.}\right)$

Bild 5.7.19 Arten der Druckfestigkeit

#### b) Zugfestigkeit bei Kurzzeitbelastung

Die Prüfung der einachsigen Zugfestigkeit  $\beta_Z$  an Prismen oder Zylindern ist schwierig, weil Beton auf Zug sehr empfindlich auf Querpressungen und Lastausmitten reagiert, siehe Bild 5.7.20. Aus diesem Grund wird die Zugfestigkeit meist mittelbar über Biegung oder Spalten bestimmt. Bei der Biegung liefert die Prüfung mit zwei Einzellasten einen geringeren Prüfwert als die mit einer Einzellast, weil die zum Bruch führende Randzugspannung über einen längeren Bereich wirkt (höhere Bruchwahrscheinlichkeit). Die Spaltzugfestigkeit wird durch Spalten von Zylindern oder Prismen bestimmt.

Die Zugfestigkeit muß an bis zur Prüfung feucht gelagerten Proben bestimmt werden, um die Verfälschung durch Schwindeigenspannungen zu vermeiden. Die axiale Zugfestigkeit ist eine wahre Festigkeit. Demgegenüber sind Biege- und Spaltzugfestigkeit technologische Festigkeits-

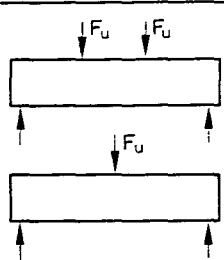
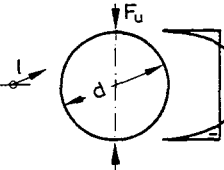
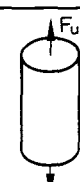
Biege- zugfestigkeit		$\beta_{BZ} = \frac{M_u}{W}$ $\bar{\beta}_{BZ} = \frac{\bar{M}_u}{W} < \beta_{BZ}$
Spaltzugfestigkeit		$\beta_{SZ} = \frac{2F_u}{\pi d l}$ Zug im Inneren
zentrische Zugfestigkeit		$\beta_Z = \frac{F_u}{A_b}$

Bild 5.7.20 Arten der Zugfestigkeit

werte, die von der Probenform usw. abhängen. Zwischen den Mittelwerten der Zugfestigkeiten und der mittleren Druckfestigkeit  $\beta_{Wm}$  wurde mit Proben nach DIN 1048 folgende Beziehung festgestellt [27] [28]:

$$\beta_{Zm} \approx c \beta_{Wm}^{2/3}$$

Bild 5.7.21 zeigt die Faktoren c für die verschiedenen Arten und auch die Größenverhältnisse der Arten untereinander:

$$\beta_{Zm} < \beta_{SZ} < \beta_{BZ}$$

In diesen Verhältnissen spiegelt sich implizit die Mechanik des spröden Reißens von Beton wider. Die Zugfestigkeit streut mehr als die Druckfestigkeit, bei der unabhängig von der Festigkeit die Streuung i. M.  $s = 3 \text{ N/mm}^2$  beträgt. Die Streuung bei Zug besitzt einen rd. doppelt so hohen Variationskoeffizienten.

Wie beim Druck besprochen, kann auch die zwei- und dreiachsige Zugfestigkeit bzw. die Zugfestigkeit bei allgemein gerichteten Spannungen geprüft werden.

A \ B	$\beta_{Wm}^{2/3}$	$\beta_{BZm}$	$\beta_{SZm}$	$\beta_{Zm}$
$\beta_{Wm}^{2/3}$	1			
$\beta_{BZm}$	0,45	1		
$\beta_{SZm}$	0,27	0,60	1	
$\beta_{Zm}$	0,24	0,53	0,89	1

$$c = A/B; \text{ Beispiel } \beta_{BZm} = 0,45 \beta_{Wm}^{2/3}$$

Bild 5.7.21 Zusammenhänge zwischen mittlerer Zugfestigkeit und mittlerer Würfeldruckfestigkeit sowie zwischen Zugfestigkeiten (nach [27])

### c) Andere Festigkeiten

Neben der Kurzzeitfestigkeit sind auch noch das Verhalten unter andauernder oder wechselnder Spannung von Bedeutung. Hierüber folgt später mehr.

#### Prüfeinflüsse

Die Druckfestigkeit wird in einer hydraulischen Prüfmaschine bestimmt; der Probekörper wird über die Endflächen und hieran anliegende Druckplatten gedrückt. Das Ergebnis wird dabei durch einige systematische Prüfeinflüsse beeinflusst.

#### a) Formeinflüsse

Neben der Ebenheit der Stirnflächen, der Maßgenauigkeit der Abmessungen und des Einbaus üben die geometrische Form, die Größe und die Schlankheit des Probekörpers einen Einfluß aus. Den Einfluß der Größe des Würfels zeigt Bild 5.7.22. Die bezogene Festigkeit nimmt bei sonst gleicher Form und Schlankheit mit Zunahme der Kantenlänge ab, weil damit die Ausbreitung der Mikrorisse erleichtert wird. Dies gilt bei prismatischen und zylindrischen Proben ebenfalls, wenn die Schlankheit  $h/d$  zunimmt: Zwischen den Endflächen und den Druckplatten entsteht ein Reibungsschluß, der über Querdehnungsbehinderung die Rißfortpflanzung bremst. Dementsprechend übertrifft die Würfel-  
festigkeit  $\beta_w$  die Prismenfestigkeit  $\beta_p \approx$  Zylinderfestigkeit  $\beta_c$ . Bild 5.7.23 zeigt, daß die beiden zuletzt genannten Festigkeitswerte ungefähr 80 bis 85% der Würfel-  
festigkeit betragen. Sie stellen die »wahre« einachsige Druckfestigkeit des Betons dar.

Auch die Zugfestigkeit wird durch Form und Größe des Probekörpers beeinflusst. Mit Zunahme der Probendicke (Biegebalken) nimmt die Zugfestigkeit ab, s. Bild 5.7.24 [29], weil ja bei geometrisch nachfolgender Zunahme des Lastabstandes die Bruchwahrscheinlichkeit zunimmt.

#### b) Maschineneinflüsse

Da ein ebener Dehnungszustand von der Stirn her aufgezungen werden muß, müssen die Druckplatten sehr biegesteif sein. Ebenso soll die Prüfmaschine sehr dehnsteif sein.

#### c) andere Einflüsse

Neben den beiden vorbeschriebenen Einflüssen gibt es eine Reihe anderer, die zwar bei der Prüfung eine Rolle spielen, aber auch wesentliche Parameter mechanischer oder physikalischer Herkunft sind und damit auch für das Verhalten des Betons im Bauteil bedeutsam sind. Beispiel: Belastungsgeschwindigkeit.

### 5.7.6.3 Werkstoffeinflüsse

#### Einfluß des Wasserzementwerts

Bei Normalbeton übt der Wasserzementwert den entscheidenden Einfluß auf die Festigkeit des Zementsteins und damit auf die des Betons aus. Dieser Einfluß entsteht über die Porosität, die selbst wieder vom W/Z-Wert abhängt. Zwischen der Druckfestigkeit und der Porosität des Zementsteins besteht folgender theoretischer Zusammenhang:

$$\beta_{st} = \beta_{sto} (1 - v_p)^n$$

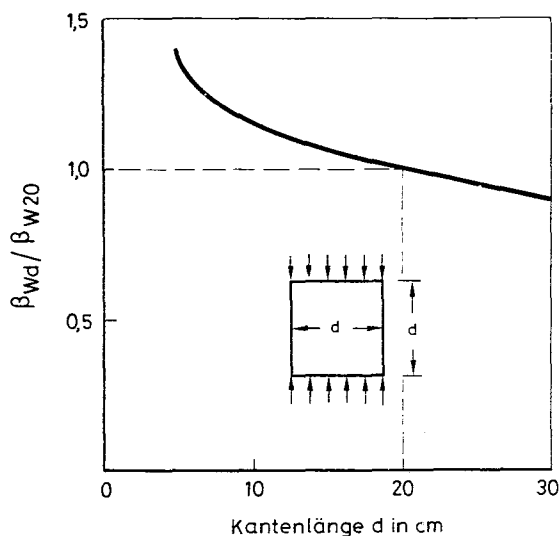


Bild 5.7.22 Einfluß der Würfelmantenlänge auf die Würfel-druckfestigkeit von Beton

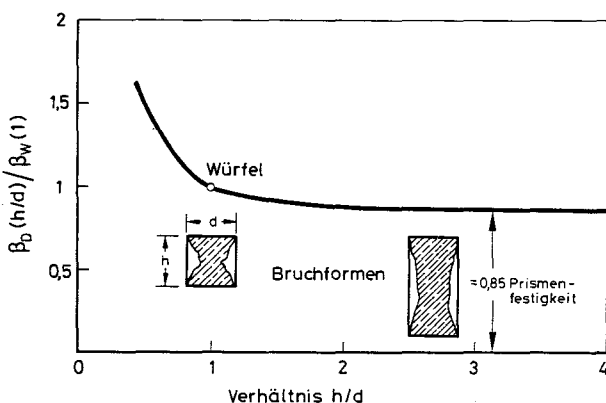


Bild 5.7.23 Einfluß der Probekörperschlankheit auf die Beton-druckfestigkeit

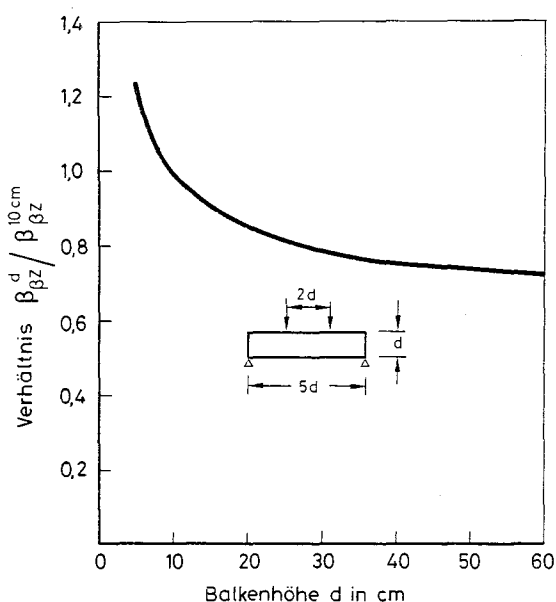


Bild 5.7.24 Einfluß der Balkenhöhe auf die Biegezugfestigkeit [29]

Hierin ist  $\beta_{st0}$  die Festigkeit des kapillarporenfreien Zementsteins und  $v_p$  ist das bezogene Volumen der Kapillar- und sonstigen Luftporen. Die o.a. Beziehung lautet dann in Anlehnung an Powers mit  $\beta_{st0} = 240 \text{ N/mm}^2$  und  $n = 3$ :

$$\beta_{st} = 240 \left[ \frac{0,72 m}{0,32 + w} \cdot \frac{1}{1 + p_l} \right]^n$$

Hierin ist  $m$  der Hydratationsgrad und  $p_l$  der Anteil an Luftporen. Bild 5.7.25 zeigt den Zusammenhang zwischen der Festigkeit und den Größen  $w$ ,  $m$  und  $p_l$ , der dem Verlauf nach mit Bild 5.7.9 übereinstimmt. Der Wasserzementwert wirkt sich in der in Bild 5.7.26 gezeigten Weise auf den Erhärtungsverlauf aus.

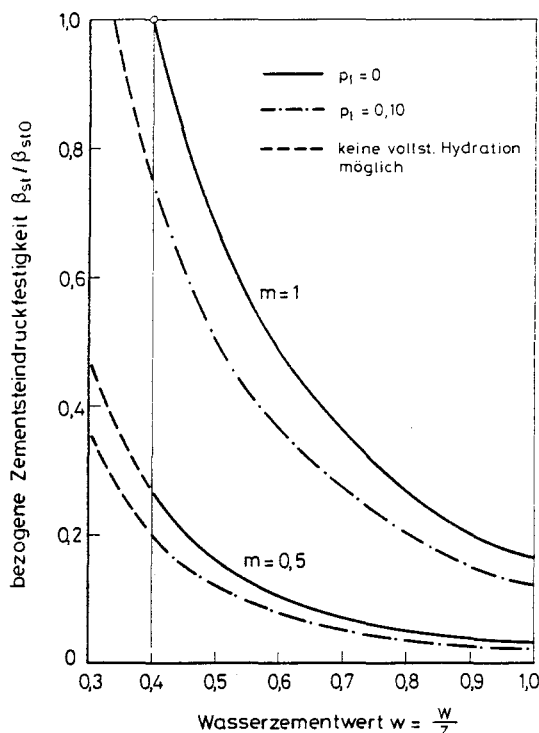


Bild 5.7.25 Theoretischer Zusammenhang zwischen Zementsteinfestigkeit, W/Z-Wert, Hydratationsgrad und Luftporengehalt

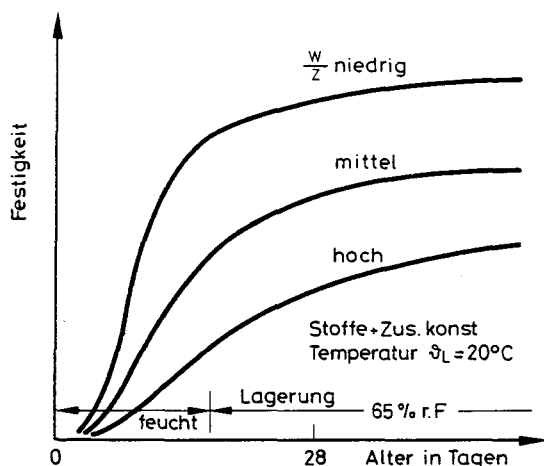


Bild 5.7.26 Einfluß des W/Z-Wertes auf Größe und Entwicklung der Festigkeit von Beton (schematisch)

### Einfluß der Zementfestigkeit

Der Einfluß der Festigkeitsklasse des Zements auf die 28-Tage-Würfeldruckfestigkeit zeigte bereits Bild 5.7.9. Bild 5.7.27 zeigt die Entwicklung der bezogenen Druckfestigkeit des Betons bei Verwendung unterschiedlich rasch erhärtender Zemente. Deutlich wird bei dieser Darstellung die Wechselwirkung zwischen Frühfestigkeit und Nacherhärtung nach 28 Tagen: Je langsamer die Anfangserhärtung, um so größer ist die Nacherhärtung und umgekehrt. Bei Erhärtung an Luft nach 7 d Feuchtlagerung ist die Nacherhärtung viel geringer.

Der Einfluß der Zementmenge bei konstantem Wasserzementwert ist gering. Erst bei großen, praxisfremden Zugaben von Zement nimmt die Betondruckfestigkeit ab.

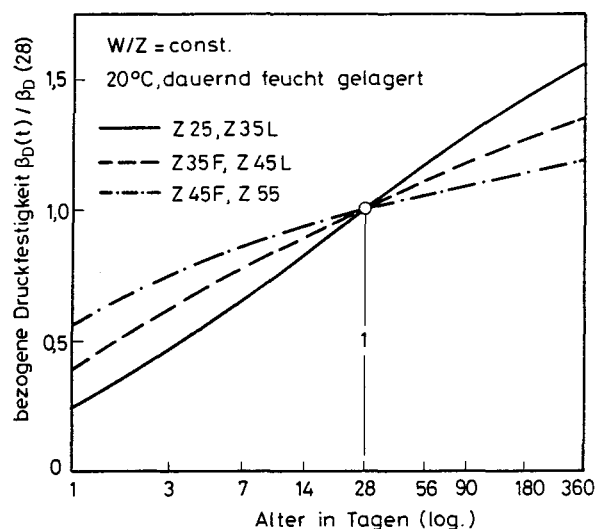


Bild 5.7.27 Einfluß der Festigkeitsklasse des Zements auf die Festigkeitsentwicklung von Beton bei dauernder Feuchtlagerung (schematisch)

### Einfluß des Zuschlags

Unter der Voraussetzung, daß die Zuschlagfestigkeit die Zementsteinfestigkeit übertrifft, übt die petrographische Herkunft des Zuschlags keinen Einfluß auf die Betonfestigkeit aus. Wenn man in Zukunft gezwungen sein wird, wegen der Rohstoffverknappung auch niedrigerfesten Zuschlag zu verwenden, so wird dieser Einfluß eine Rolle spielen. Der Stoffraumanteil des Zuschlags liegt in der Praxis zwischen 65 und 75 Vol.-%. Innerhalb dieser Spanne ist der Einfluß der Menge gering, mit Tendenz der Zunahme der Betondruckfestigkeit bei Zunahme der Zuschlagsmenge. Kornform und Oberflächenrauigkeit beeinflussen den Verbund zwischen Zuschlag und Zementstein. Die raue Oberfläche von gebrochenem Naturstein führt zu einer höheren Zugfestigkeit des Betons als bei natürlich gerundetem Kies.

### Einfluß der Verdichtung

In Abhängigkeit von der Betonkonsistenz müssen Gerät und Aufwand der Verdichtung so gewählt werden, daß eine praktisch vollständige Verdichtung ermöglicht wird. Restliche, nicht ausgetriebene Poren wirken als Schwachstellen, von denen aus sich Mikrorisse bilden.

#### 5.7.6.4 Einfluß der Erhärtingsbedingungen

##### Vorbemerkung

Die zeitliche Entwicklung der Festigkeit hängt von den Erhärtingsbedingungen ab, also von der Temperatur  $\vartheta_b$  und der Feuchte  $u$  des Betons an jeder Stelle im Bauteil. Beton-temperatur und Feuchte stehen mit den Umweltbedingungen (Lufttemperatur, Strahlungseinfluß, Luftfeuchte und Wind) wegen des Austausches über die Bauteiloberfläche in Beziehung.

Bild 5.7.28 enthält Begriffe der Erhärtung, wobei aber die Grenzen zwischen den Bereichen fließend sind. Verlauf und Zustand der Zementsteinerhärtung können mit den Begriffen Hydratationsgrad und Festigkeit beschrieben werden, die einander i. w. entsprechen:

$$\beta(t, \vartheta_b, u) \triangleq m(t, \vartheta_b, u)$$

Optimale Erhärtingsbedingungen liegen bei einer Beton-temperatur um 20 °C und bei dauerndem Schutz vor Austrocknung bzw. bei Feuchthaltung vor. Es ist die Aufgabe der Nachbehandlung, diese Bedingungen zumindest während der Anfangserhärtung zu schaffen. Im folgenden werden die Einflüsse von Temperatur und Feuchte gesondert besprochen, obwohl diese sich in der Praxis i. d. R. gegenseitig beeinflussen.

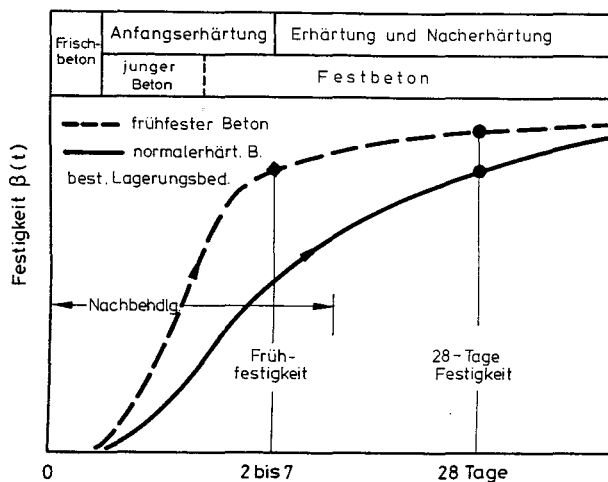


Bild 5.7.28 Begriffe der Festigkeitsentwicklung bzw. des Erhärtungsverlaufs (schematisch)

##### Einfluß der Temperatur auf die Erhärtung

Die Zementsteinerhärtung wird, v. a. in den ersten Tagen und Wochen, wie viele andere chemische Prozesse durch hohe Temperaturen beschleunigt und durch niedrige verlangsamt. Dies ist baupraktisch sehr bedeutungsvoll (Ausschfrist, frühes Vorspannen u. a. m.).

Bild 5.7.29 zeigt den Erhärtungsverlauf innerhalb der ersten vier Wochen, abhängig von der Lagerungstemperatur unmittelbar nach Herstellung [30]. Die Probekörper wurden dauernd feucht gehalten. Die Lagerungstemperatur – 4 °C konnte erst nach rd. 1 Tag wegen der Gefrierbeständigkeit aufgebracht werden. Die Erhärtung setzt um so früher ein, je höher die Temperatur ist. Durch erhöhte Temperatur wird die Frühfestigkeit gesteigert. Diese Tatsache wird bei den Verfahren zur Verfestigung von Beton gezielt genutzt (Warmbehandlung, Dampfhärtung u. a.).

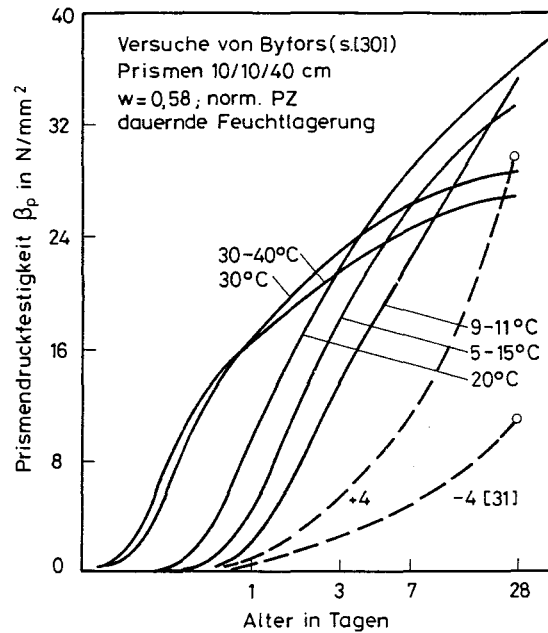


Bild 5.7.29 Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur innerhalb der ersten 28 Tage

Die Höhe der Temperatur wirkt sich sowohl auf die 28-Tage-Festigkeit als auch auf die Nacherhärtung aus, wie in Bild 5.7.30 dargestellt ist [31]. Dabei wurden die Erhärtungsverläufe bei unterschiedlichen Lagerungstemperaturen auf den Erhärtungsverlauf bei +23 °C bezogen. Durch hohe Temperaturen werden, gemessen an +23 °C, sowohl die 28-Tage-Festigkeit als auch die Nacherhärtung verringert. Temperaturen unter 23 °C bewirken das Gegenteil. Die geschilderten Zusammenhänge gelten auch für die Betonzugfestigkeit.

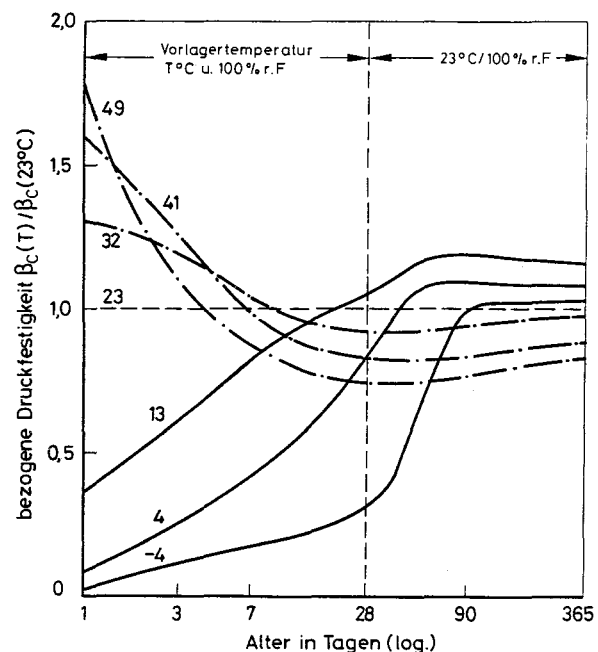


Bild 5.7.30 Einfluß der Temperatur bis Alter 28 d auf die Entwicklung der Druckfestigkeit [31]

In der Praxis erhärtet der Beton oft bei unterschiedlichen Temperaturen. Bei der Wärmebehandlung von Beton wird sogar bewußt eine kurzzeitige Erwärmung vorgenommen. Der Einfluß unterschiedlicher Erhärtungstemperaturen kann mit dem Reifegrad nach Saul

$$R = t (\vartheta_b + 10) \text{ in } ^\circ\text{C} \cdot \text{Tagen oder } ^\circ\text{C} \cdot \text{h}$$

abgeschätzt werden, der Ausdruck des Hydratationsgrades ist [16].

Weil bis zu einer Temperatur von  $-10^\circ\text{C}$  noch Erhärungsreaktionen stattfinden, ergibt sich die wirksame Erhärtungstemperatur als  $\vartheta_{bw} = \vartheta_b + 10^\circ\text{C}$ . Voraussetzung zur Anwendung der Reifeformel ist die Kenntnis des Erhärungsverlaufs des betrachteten Betons bei z.B.  $20^\circ\text{C}$ , die vorab durch Versuche bestimmt werden muß. Da Betone gleichen Reifegrads auch die gleiche Festigkeit besitzen, kann man wegen (siehe Bild 5.7.31)

$$\frac{\beta_w(t, \vartheta_b)}{\beta_w(t_{20}, 20^\circ\text{C})} = \frac{t(\vartheta_b + 10)}{t_{20} \cdot 30}$$

die erforderliche Lagerungsdauer bei der Temperatur  $\vartheta_b$  errechnen:

$$\text{erf } t = \frac{30}{\vartheta_b + 10} t_{20}$$

Beispiel:

$$\vartheta_b = 5^\circ\text{C}, \text{ erf } t = ?, t_{20} = 28 \text{ d}$$

$$\text{erf } t = \frac{30}{15} 28 = 56 \text{ d}$$

Die Druckfestigkeit hängt, wie Bild 5.7.31 beispielhaft zeigt, mit der Erhärungszeit und damit auch mit dem Reifegrad zusammen. Will man also wissen, welche Festigkeit ein Beton nach  $t$  Tagen bei der Temperatur  $\vartheta_b$ , gemessen an einem bei  $+20^\circ\text{C}$  erhärteten Beton erreicht hat, so berechnet man den Reifegrad  $R$  und liest die Festigkeit aus der Kurve ab. Diese Kurve mußte aber zuvor durch Versuche bei  $20^\circ\text{C}$  bestimmt werden.

Beispiel:

$$\vartheta_b = 5^\circ\text{C}; t = 7 \text{ d}, \beta_w(7 \text{ d}, 5^\circ\text{C}) = ?$$

$$R = 7 \cdot (5 + 10) = 105^\circ\text{Cd}$$

$$\beta_w(7 \text{ d}; 5^\circ\text{C}) \approx 0,54 \cdot \beta_w(28 \text{ d}, 20^\circ\text{C})$$

Die Reifeformel kann auch für veränderliche Temperaturen benutzt werden, indem man für jede Temperaturstufe  $\vartheta_{bi}$  und deren Dauer  $\Delta t_i$  die Teilreifen berechnet und addiert:

$$R = \sum \Delta t_i (\vartheta_{bi} + 10)$$

Auf diese Weise kann sowohl der Einfluß niedriger Temperaturen während der Anfangserhärtung als auch die Wirkung hoher Temperaturen einer Warmbehandlung abgeschätzt werden.

#### Einfluß der Feuchte des Betons während der Erhärtung

Durch die Nachbehandlung muß während der Anfangserhärtung der Verlust von Wasser durch Austrocknen verhindert werden, da zur Hydratation ein Überschuß von Wasser angeboten werden muß. Bei einem W/Z-Wert  $< 0,45$  muß sogar Wasser von außen angeboten werden, um die Selbst-austrocknung zu verhindern [1].

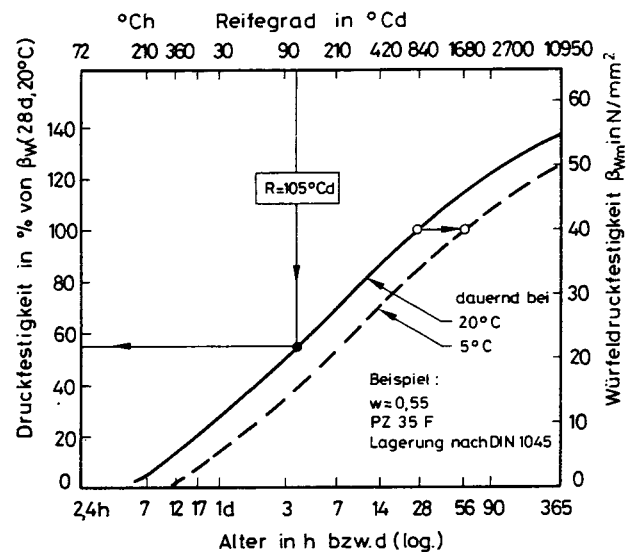


Bild 5.7.31 Entwicklung der Betondruckfestigkeit abhängig von Alter oder Reifegrad (schematisch)

Bereits Bild 5.7.11 zeigte, daß bei Abnahme der Dauer der feuchten Nachbehandlung nicht nur die Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen abnimmt, sondern auch die Nacherhärtung zum Stillstand kommt.

In der Praxis wird die Nachbehandlung i. d. R. im Alter von 7 bis 14 Tagen beendet. Der mittlere Hydratationsgrad und damit die Festigkeitsentwicklung im Bauteil hängen neben den Trocknungsbedingungen auch von den Abmessungen, ausgedrückt durch das Verhältnis Volumen/Oberfläche, ab.

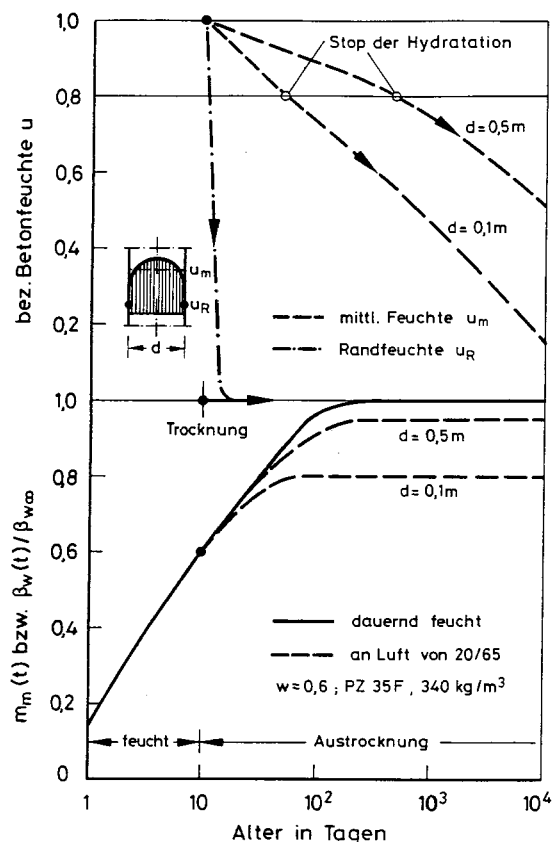


Bild 5.7.32 Mittlerer Hydratationsgrad und Festigkeitsentwicklung abhängig von der Austrocknung, schematisch

Bild 5.7.32 zeigt für zweiseitig austrocknende Platten oder Wände, daß der mittlere Hydratationsgrad um so niedriger ist, je dünner das Bauteil ist [32]. Dies hängt unmittelbar mit dem Austrocknungsverhalten zusammen, das in der oberen Bildhälfte dargestellt ist. Hierin ist sowohl die mittlere bezogene Betonfeuchte  $u_m$  als auch die Randfeuchte  $u_R$  abhängig von der Trocknungszeit aufgetragen. Die bezogene Betonfeuchte wird wie folgt definiert:

$$u_m = \frac{W_m(t) - W_{gl}}{W_o - W_{gl}} \quad \text{bzw.} \quad u_R = \frac{W_R(t) - W_{gl}}{W_o - W_{gl}} \approx \frac{1}{4} \frac{W(t) - W_{gl}}{W_o - W_{gl}}$$

Hierin bedeuten:  $W_o$  Anfangswassergehalt;  $W_{gl}$  Ausgleichswassergehalt;  $W_m(t)$  mittlerer Wassergehalt und  $W_R(t)$  Wassergehalt der Randschicht. Durch Trocknung in einem bestimmten Klima ist die Differenz  $W_o - W_{gl}$  austreibbar. Sinkt nun der Dampfdruck in den Betonporen unter rd. 80%, was etwa auch einer bezogenen mittleren Betonfeuchte von 0,8 entspricht, so stoppt die Erhärtung. Dicke Bauteile  $d > 1,0$  m erhärten i. M. unbeeinflusst durch die Trocknung als wären sie dauernd feucht gelagert. Da die Feuchte der Randschicht sehr rasch auf Null abfällt, hängt deren Hydratationsgrad und Festigkeit unmittelbar von der Dauer der Nachbehandlung ab. Dies ist für Sichtbetonbauteile oder chemisch angegriffene Bauteile und deren Dauerhaftigkeit sehr bedeutsam.

#### 5.7.6.5 Einfluß der Mehrachsigkeit der Beanspruchung

Die einachsige Prismen- oder Zylinderfestigkeit ist die maßgebende Festigkeit für Bauteile, wie mittig gedrückte Stützen oder Wände. Bereits in Balken, v. a. aber in Flächentragwerken treten zweiachsige, an Tragwerksknoten sogar dreiachsige Spannungszustände auf [33], [34], [35].

Bild 5.7.33 zeigt die Umhüllende der zweiachsigen Betonfestigkeit, die zur Winkelhalbierenden symmetrisch sein muß.

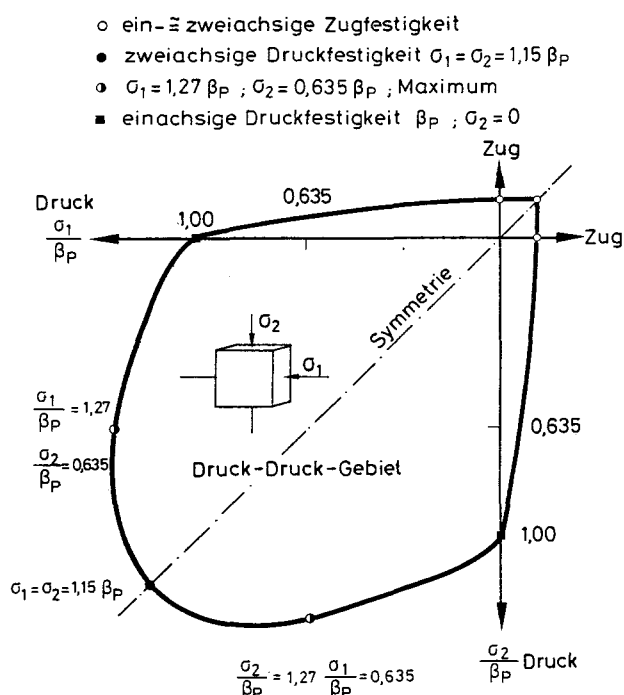


Bild 5.7.33 Zweiachsige Festigkeit von Beton

Jeder Punkt auf der Umhüllenden ist ein Festigkeitswert, ausgedrückt durch das auf die Prismenfestigkeit bezogene Spannungspaar  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$ . Betrachten wir den Bereich oberhalb der Winkelhalbierenden: Die Kombination  $\sigma_1/\sigma_2 = \beta_P/O$  ist die einachsige Festigkeit. Bei Kombination  $\sigma_1 = \sigma_2$  tritt der Bruch bei der 1,15fachen Prismenfestigkeit ein; und die Kombination  $\sigma_1/\sigma_2 = 1/0,635$  liefert mit  $\sigma_1 = 1,27 \beta_P$  den Größtwert der zweiachsigen Druckfestigkeit. Druckspannungen  $\sigma_2$  verhindern die Ausbreitung von Mikrorissen, Zugspannungen  $\sigma_1$  fördern sie und mindern deshalb die Festigkeit. Spannungs-kombinationen innerhalb der Umhüllenden werden natürlich ohne Bruch ertragen.

Aus der unendlichen Vielfalt dreiachsiger Spannungszustände stellt Bild 5.7.34 nur einen Ausschnitt aus dem dreiachsigen Druckbereich dar. Bei gleichen Spannungen  $\sigma_1 = \sigma_2$  steigt die Bruchspannung  $\sigma_3$  mit Zunahme von  $\sigma_1 = \sigma_2$  an.

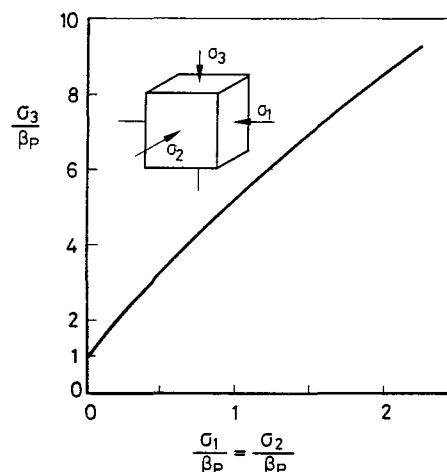


Bild 5.7.34 Dreiachsige Druckfestigkeit  $\sigma_3/\beta_P$  bei  $\sigma_1 = \sigma_2$

#### 5.7.6.6 Einfluß der Beanspruchungsgeschichte

##### Grundformen

Bei der Festigkeitsprüfung nach Normen werden dem Probekörper die Beanspruchungen nach vereinheitlichten Regeln aufgezwungen, die i. w. aus Gründen der Vergleichbarkeit festgelegt wurden. In der Praxis kann jedoch je nach Anwendungs- und Lastfall eine unendliche Vielfalt von Spannungs-Zeit- oder Spannungs-Verformungsgeschichten in den Bauteilen ablaufen.

Mit den Bildern 5.7.35 bis 5.7.37 sind die wesentlichen Grundformen der Beanspruchungsgeschichte dargestellt. Die Kurzzeitfestigkeit wird bei zügiger Beanspruchung bis zum Bruch gewonnen, wobei die einfachste Form des Spannungspfades  $\dot{\sigma}(0 \rightarrow t_u)$  die Gerade mit konstanter Spannungsgeschwindigkeit  $\dot{\sigma} = \text{const}$  ist. Alternativ kann auch eine konstante Dehngeschwindigkeit gewählt werden, worauf noch eingegangen wird. Ggf. ist auch die Restfestigkeit nach einer Vorbelastung von Bedeutung. Bei der mehrachsigen Festigkeit bestimmen die Spannungspfade die Festigkeit nachhaltig.

Bei langandauernder Beanspruchung ist die Standfestigkeit maßgebend, die als Wertepaar Bruchspannung/Bruchzeit definiert ist. Schließlich ist für nicht vorwiegend ruhende Beanspruchungen die Schwingfestigkeit von Ausschlag, die von zahlreichen Last- und Zeitparametern abhängt.



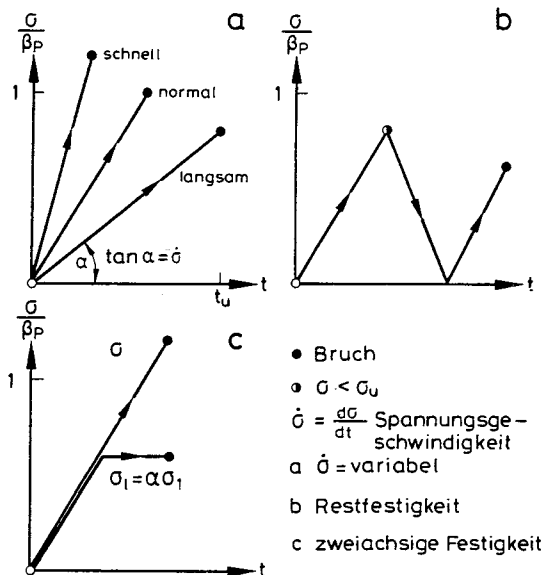


Bild 5.7.35 Grundformen der zügigen Beanspruchung

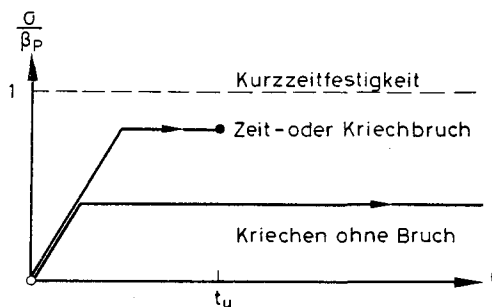


Bild 5.7.36 Grundformen der Standfestigkeit

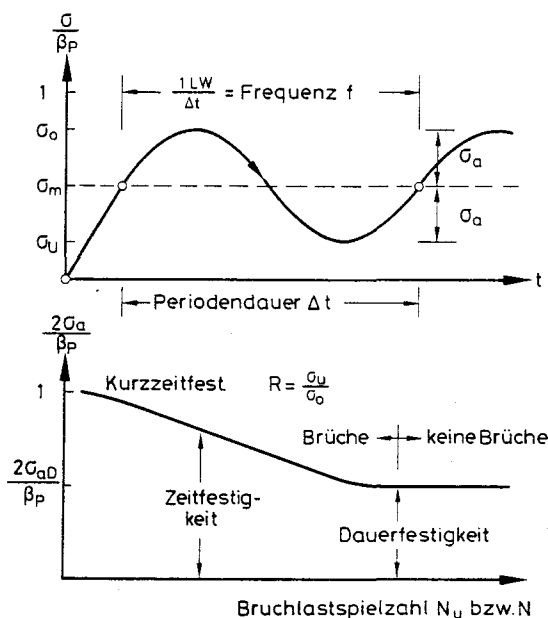


Bild 5.7.37 Grundformen der Dauerschwingfestigkeit

### Einfluß der Beanspruchungsgeschwindigkeit bei zügiger Belastung

Zunächst sind einige Bemerkungen zur Beanspruchungsgeschwindigkeit notwendig. Bei einem spröde-elastischen Stoff erhält man sowohl bei konstanter Spannungs- als auch bei konstanter Dehngeschwindigkeit ein und dieselbe Festigkeit, weil wegen

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$\sigma_u = \beta = E \varepsilon_u$$

und

$$\frac{d\sigma}{dt} = E \frac{d\varepsilon}{dt} \rightarrow \dot{\sigma} = E \cdot \dot{\varepsilon}$$

beide miteinander linear verknüpft sind.

Bei einem viskoelastischen Stoff, wie Beton auf Druck, ist dieser lineare Zusammenhang v. a. in Bruchnähe nicht mehr möglich. Bei einer konstanten Spannungsgeschwindigkeit wird weder die Prismenfestigkeit erreicht, noch ist ein abfallender Spannungsast jenseits von  $\beta_P$  möglich. Dies kommt daher, weil am Spannungsmaximum die Dehngeschwindigkeit ins Uferlose wachsen müßte. Denn bei

$$\dot{\sigma} = \text{const}$$

müßte am Maximum die Dehngeschwindigkeit  $\dot{\varepsilon} \rightarrow \infty$  gehen:

$$\left( \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{\sigma = \beta_P} = \frac{\dot{\sigma}}{\dot{\varepsilon}} = \frac{\text{const}}{\infty} = 0$$

Dies ist weder mechanisch noch prüftechnisch denkbar. Durch Entladung der gespeicherten Federenergie der Prüfmaschine wird der Probekörper ungefähr bei  $0,95 \beta_P$  zerdrückt.

Wird jedoch der Bruchversuch dehngesteuert mit  $\dot{\varepsilon} = \text{const}$  gefahren, so ist Bedingung

$$\left( \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{\sigma = \beta_P} = \frac{\dot{\sigma}}{\dot{\varepsilon}} = \frac{0}{\text{const}} = 0$$

im Maximum erfüllt. Vollständige  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Diagramme mit Maximum und fallendem Ast können nur mit kontrollierter Dehngeschwindigkeit gewonnen werden.

Die normale Spannungsgeschwindigkeit bei Druck- und Zugversuchen an Betonproben bewegt sich zwischen  $0,2$  bis  $0,8 \text{ N/mm}^2\text{s}$ . Je nach Belastungsart, Lastfall usw. kann sie im Bauteil sowohl beträchtlich langsamer als auch beträchtlich schneller sein. Im Falle des sehr langsamen Anstiegs der Spannung nähert sich die Festigkeit der Dauerstandfestigkeit von rd.  $0,8 \beta_P$ . Demgegenüber führen sehr hohe Spannungsgeschwindigkeiten, wie sie z. B. bei einem Anprall auftreten, zu einer Zunahme der Festigkeit. Bild 5.7.38 zeigt die Abhängigkeit der Druck- und Zugfestigkeit von der Spannungsgeschwindigkeit sowie die ungefähre Zuordnung der Lastfälle. Dabei wurde als statische Bezugsfestigkeit  $\beta_0$  jene gewählt, die mit  $\dot{\sigma}_0 = 10^{-4} \text{ N/mm}^2 \cdot \text{ms} \triangleq 0,1 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$  bestimmt wurde [36 bis 39].

### Einfluß einer Dauerstandbelastung

Durch hohe Dauerspannungen wird die Kurzzeitfestigkeit vermindert. Bild 5.7.39 zeigt die Zusammenhänge. Eine Dauerspannung in Nähe der Prismenfestigkeit kann nur

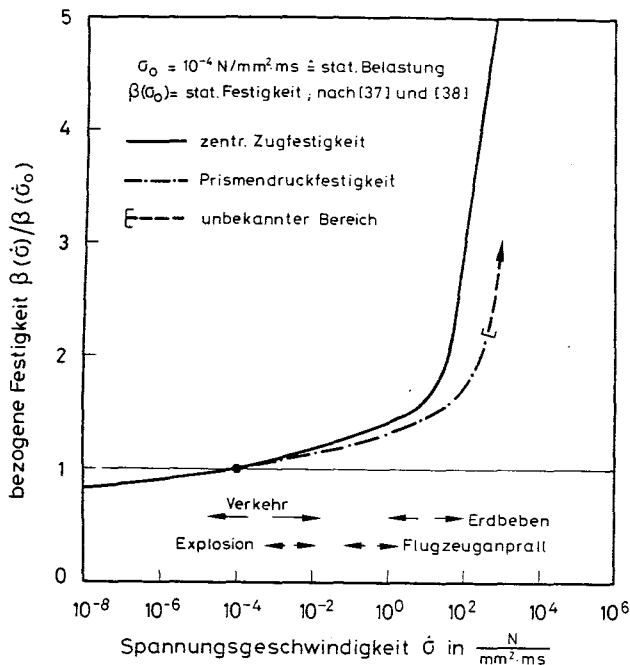


Bild 5.7.38 Bezoogene Druck- und Zugfestigkeit des Betons abhängig von der Spannungsgeschwindigkeit

eine gewisse Zeit, nämlich  $t_u$ , getragen werden, an der dann ein Zeitstand- oder Kriechbruch eintritt. In Bruchnähe wächst die Dehnung progressiv an. Mit Abnahme der Spannung nimmt die Standzeit  $t_u$  zu. Die Dauerstandfestigkeit ist jene Spannung, die gerade noch bruchfrei beliebig lang ertragen wird. Unter ihr strebt die Dehnung einem Grenzwert zu.

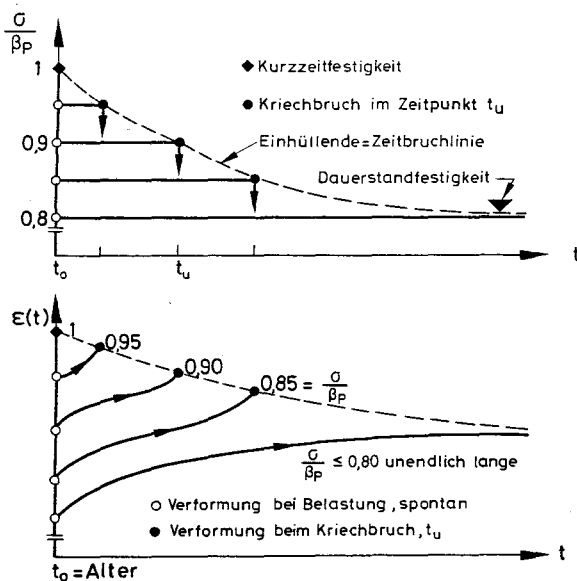


Bild 5.7.39 Spannungen und Dehnungen bei der Dauerstandbelastung gedrückten Betons

Bei Beton wirkt der Entfestigung durch den Dauerstandeinfluß die Nacherhärtung entgegen, die mit Zunahme der Zeit einen Festigkeitsgewinn liefert [12]. Man erkennt aus Bild 5.7.40 für einen im Alter 28 d belasteten Beton, daß sich

infolge dieser gegenläufigen Effekte ein Tiefstwert der Zeitstandfestigkeit von rd.  $0,8 \beta_{P28}$  einstellt, der eine kritische Bruchzeit von rd. 2 Tagen besitzt. Diese Spannung bezeichnet man als Dauerstandfestigkeit:

$$\beta_{P\infty} \approx 0,8 \beta_{P28} \quad t_0 \geq 28 \text{ d}$$

Die Spannungen in Bauwerken liegen unter 0,4 bis 0,5  $\beta_P$ , so daß ein ausreichender Sicherheitsabstand gewahrt ist. Die Dauerstandfestigkeit hängt besonders vom Belastungsalter ab. Je höher das Alter bei Erstbelastung, um so größer ist die Dauerstandfestigkeit und umgekehrt. Die Dauerstandfestigkeit bei zentrischem Zug liegt ungefähr bei 0,6 bis 0,7  $\beta_Z$  und streut beträchtlich.

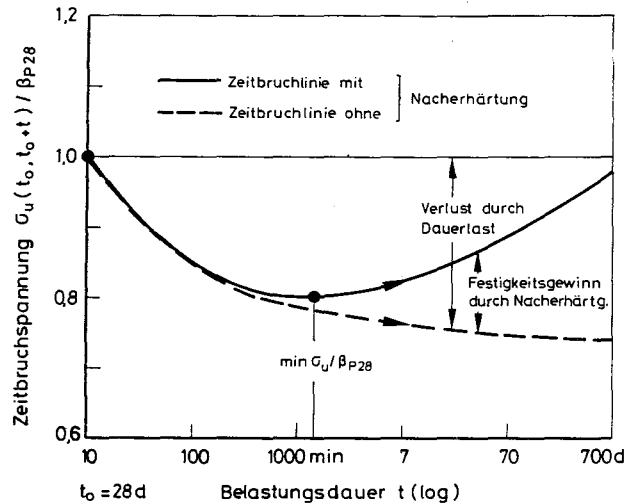


Bild 5.7.40 Dauerstandfestigkeit von Beton auf Druck

#### Einfluß einer wiederholten Dauerbeanspruchung

Zahlreiche Bauwerke, z.B. Straßenbrücken sind Lastwiederholungen unterworfen, die eine Druckschwellbeanspruchung des Betons erzeugen. Als Dauerfestigkeit wird ebenso wie bei Stahl jene maximale Oberspannung definiert, die zusammen mit der Schwingbreite  $\Delta\sigma = 2\sigma_a \cdot 2 \cdot 10^6$  mal ertragen wird. Bild 5.7.41 zeigt das Smith-Dauerfestigkeitsschaubild von Beton auf Druck. Man erkennt, daß die Dauerfestigkeit im Falle von  $\sigma_u = 0$  mit  $\sigma_D \approx 0,6 \beta_P$  deutlich unter der Dauerstandfestigkeit liegt. In [40] und [41] ist der heutige Kenntnisstand zusammengestellt.

#### 5.7.6.7 Einfluß hoher und tiefer Temperaturen

Die Festigkeit von Beton bei hohen Temperaturen muß für die Berechnung der Tragwerksicherheit im Brandfall und für Bauwerke der Energietechnik (Kernkraftwerke, Wärmespeicher usw.) bekannt sein.

Bei der Erwärmung von Beton laufen in Abhängigkeit von der Temperatur folgende Reaktionen ab [42]: Zwischen 20 °C und rd. 200 °C wird das in Grobporen lose lagernde bis schwach sorptiv gebundene Wasser ausgetrieben. Bis rd. 500 °C wird das physikalisch gebundene Wasser der feinen Kapillar- und Gelporen ausgedampft. Zwischen 500 °C und 700 °C zerfallen zunächst das Calciumhydroxid und dann die CSH-Phasen des Zementsteins; beide Zersetzungen

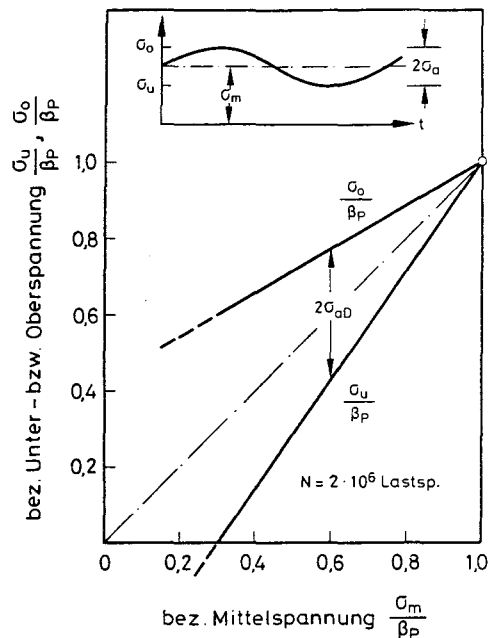


Bild 5.7.41 Dauerschwelldruckfestigkeit von Beton

sind mit Wasserabgabe verbunden. Bei Kalksteinzuschlag tritt ab rd. 600 °C die Kalksteinentsäuerung ein. Quarzzuschlag erfährt bei rd. 570 °C eine Kristallumwandlung. Das Schmelzen der Zuschläge beginnt je nach Gesteinsart ab rd. 1200 °C.

Die geschilderten Entwässerungs- und Zersetzungs Vorgänge schlagen sich in der Druckfestigkeit nieder. Bild 5.7.42 zeigt den Verlauf der Heißdruckfestigkeit von Kalksteinbeton bei freier Austrocknung und zügiger Aufheizung auf die Prüftemperatur. Wird der Probekörper unbelastet

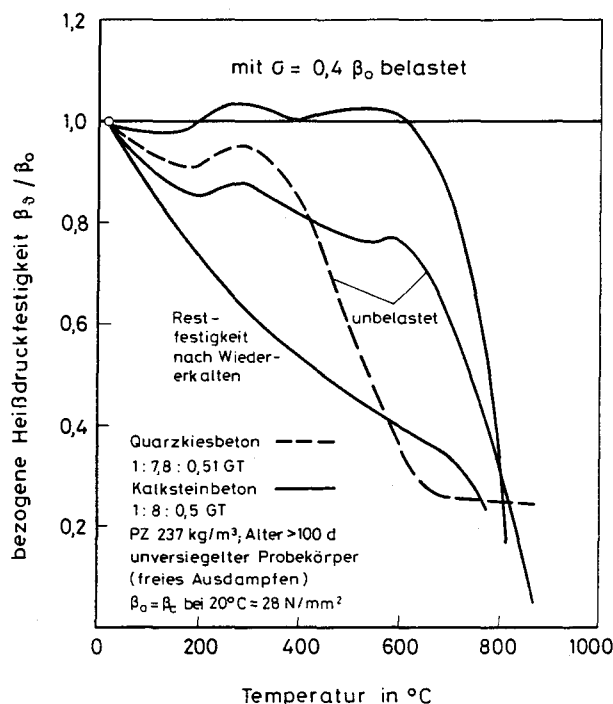


Bild 5.7.42 Heißdruckfestigkeit von Beton bei und nach zügiger Aufheizung und freier Austrocknung nach [42]

aufgeheizt und dann an der Temperatur geprüft, so tritt von 20 °C bis rd. 600 °C ein monotoner Festigkeitsverlust auf, der ab 600 °C abrupt zunimmt. Durch eine während des Aufheizens wirkende Spannung von mehr als 20% der kalten Zylinderdruckfestigkeit wird der Festigkeitsabfall verzögert. Den stärksten Verlust erfährt die Restfestigkeit nach Abkühlung auf 20 °C. Neben der Vorbelastung wird die Heißdruckfestigkeit vornehmlich von der Art und Menge des Zuschlags beeinflusst. Quarzkiesbeton erleidet im Vergleich zu Beton mit Kalkstein und künstlich geblähtem Leichtzuschlag stärkere Verluste. Zuschlagreiche Betone erfahren, v. a. bei Verwendung von Kalkstein, geringere Festigkeits-einbußen.

In den Bauten der Energietechnik können Dauertemperaturen von  $\leq 100$  °C und Störfalltemperaturen von bis 300 °C kurzzeitig auftreten. Da die Bauteile oft massig sind, mußte die Festigkeit sowohl bei freier Austrocknung als auch bei vollständiger Behinderung des Trocknens (Versiegelung) untersucht werden [43]. Ab einer Temperatur von rd. 100 °C führt die Versiegelung zu einer stärkeren Festigkeitseinbuße als die freie Austrocknung, ein Effekt, der bei Kalksteinzuschlag ausgeprägter als bei Quarzzuschlag ist. Die Entfestigung nimmt mit der Höhe und Dauer der Temperatur zu. Dies gilt auch für eine wiederholte Temperatureinwirkung.

Zur Lagerung von verflüssigtem Erdgas (−165 °C bei Atmosphärendruck) werden zunehmend Spannbetonbehälter gebaut. Wie Bild 5.7.43 zeigt, führen tiefe Temperaturen zu einer Verfestigung, die um so höher ausfällt, je höher der Feuchtigkeitsgehalt des Betons ist. Andererseits erleidet der Beton durch Tieftemperaturzyklen eine Entfestigung.

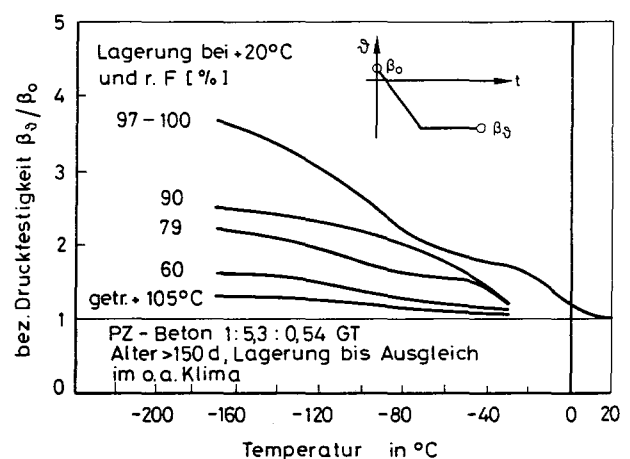


Bild 5.7.43 Tieftemperaturfestigkeit abhängig von der Betonfeuchte [44]

Diese Entfestigung zeigt sich in der monotonen Abnahme der Druck- und Zugfestigkeit mit jedem Temperaturwechsel (s. Bild 5.7.44). Diese Entfestigung ist aber nur bei einem sehr hohen Feuchtegehalt des Betons von Bedeutung, wie er bei W/Z-Werten  $\geq 0,5$  und vollständiger Versiegelung gegeben ist. In [44] ist der gegenwärtige Kenntnisstand dargestellt.

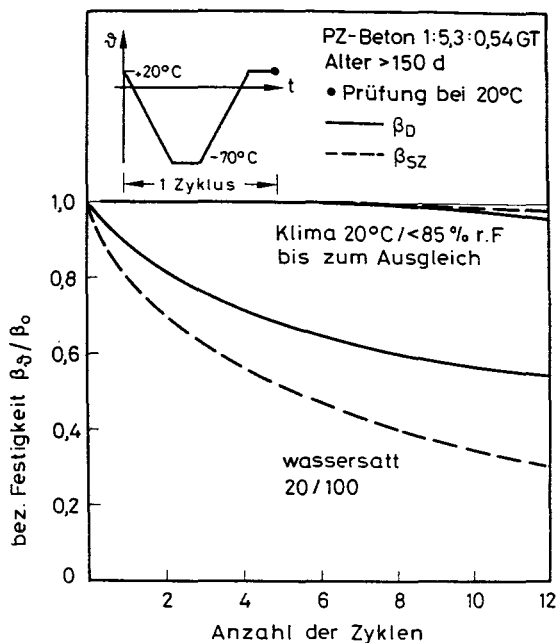


Bild 5.7.44 Restfestigkeit bei +20 °C nach Tieftemperaturzyklen [44]

Die Druckfestigkeit eines Betons, der bis zur Prüfung in einem bestimmten Lagerungsklima [ $\vartheta_L$ ,  $\varphi$ ] erhärtete, wird durch Veränderung der Betonfeuchte vor Prüfung verändert. Lufttrockner Beton erfährt durch Feuchtlagerung einen Festigkeitsabfall, feuchttgelagerte Betone werden durch Trocknung vor der Prüfung fester. Man hat dies über die Veränderungen des Abstands der Gelpartikel erklärt, der bei Feuchtezufuhr größer und bei Trocknung kleiner wird. Die Festigkeit des Zementsteins entsteht teilweise über elektrostatische Anziehung, deren Bindekraft mit steigendem Abstand der Teilchen rasch verfällt.

#### 5.7.6.8 Möglichkeiten zur Verfestigung von Beton

In manchen Anwendungsfällen strebt man nach einer höheren Früh- und/oder Endfestigkeit des Betons, als sich diese bei normaler Erhärtung einstellen würde. Oft ist die Dauerhaftigkeit, Chemikalienbeständigkeit oder die Zugfestigkeit und Bruchzähigkeit für den besonderen Fall nicht genügend. Die Ansätze und die Maßnahmen zur Verfestigung sind vielfältig. Sie sind in Stichworten in Tab. 5.7.10 zusammengefaßt.

Tab. 5.7.10 Möglichkeiten der Verfestigung von Beton

Möglichkeit	Maßnahmen	Ziele	Literatur
Betontechnologie $\vartheta_b \leq 40\text{ °C}$	Verwendung schnell erhärt. Zements niedriger W/Z-Wert, in Kombination mit BV oder Fließmittel festigkeitsbildende Zusatzstoffe (Silikatstaub) Erstarrungsbeschleuniger (kein $\text{CaCl}_2$ ) Erwärmung der Ausgangsstoffe	Steigerung der Frühfestigkeit bei Fertigteilen, Ortbeton bei kühler Witterung	[1] [8]
Wärme $\vartheta_b \leq 70\text{ °C}$	Sattdampf $\vartheta_D \approx 100\text{ °C}$ Warmluft + Feuchte Aufheizen von Schalung und Abdeckung Elektrowärme (Heizdraht)	Fertigteile und Betonwaren mit hoher Frühfestigkeit	[8] [46]
Wärme und Druck	gespannter Dampf und Druck (z. B. im Autoklav)	hohe Frühfestigkeit auch für Verfestigung des Gasbetons angewandt	
Verdichtung Überdruck Vakuum	Entfernen von Poren, Schließen von Poren durch intensive Verdichtung + Druck. Entfernen von Überschußwasser durch Vakuum(-beton)	Steigerung der Früh- und Endfestigkeit; erhöhte Dauerhaftigkeit	[1]
Polymermodifikation	Porenfüllung durch Kunststoffe Verbesserung der Haftzone Matrix-Zuschlag durch Kunststoff	Verbesserung v. a. der Zug- festigkeit und der Dauer- haftigkeit	[22]
Faserarmierung	Zugabe von kurzen, ungerichteten Fasern aus Glas, Kunststoff und Stahl zum Frischbeton	Steigerung v. a. der Zug- festigkeit und des Arbeits- vermögens/Zähigkeit	[1] [45]

## 5.7.7 Verformungsverhalten von Normalbeton

### 5.7.7.1 Einteilung

Gleichrangig zur Festigkeit des Betons ist auch sein Verformungsverhalten für den Entwurf der Bauteile von großer Bedeutung. Der Beton im Bauteil erfährt eine Reihe von Verformungen, deren grobe Einteilung in Tab. 5.7.11 aufgeführt ist.

Die Formänderungen des Betons werden sowohl von der elastischen Phase »Zuschlag« als auch von der viskoelastischen Phase »Zementstein« bestimmt, wobei durch die Koppelung der Phasen über Verbund das Einzelverhalten verschmiert wird.

Tab. 5.7.11 Verformungen des Betons

lastabhängige Verformungen		lastunabhängige Verformungen	
zeit-unabhängig	zeit-abhängig	zeit-unabhängig	zeit-abhängig
elastische Verformungen	Kriechen	Wärmedehnung	Schwinden Quellen

### 5.7.7.2 Verformungen bei Kurzzeitbelastung

#### Spannungs-Dehnungs-Linie

Die Spannungs-Dehnungslinie von Beton bei einachsigem Druck enthält außer der Prismen- oder Zylinderfestigkeit noch weitere Informationen über das Verformungsverhalten. Bild 5.7.45 zeigt eine typische  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie: Sie ist von Anfang an gekrümmt und folgt somit im aufsteigenden Ast nur näherungsweise dem Hooke'schen Gesetz  $\sigma = E\epsilon$ . Bei einer Längsdehnung von rd.  $-2\text{‰}$  wird das Spannungsmaximum erreicht. Bei dehngesteuerter Belastung  $\dot{\epsilon} = \text{const}$  ist aber damit der Widerstand des Betons noch nicht erschöpft. Er verweicht aber zusehends, bis er bei Bruch-

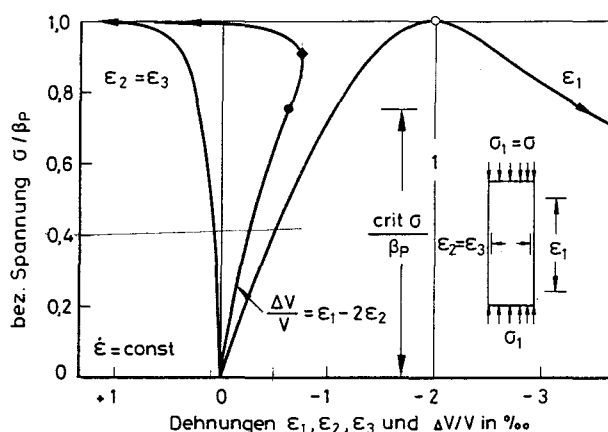


Bild 5.7.45 Längs-Quer- und Volumendehnung von Beton bei einachsigem Druck

dehnungen von mehr als  $-4$  bis  $-5\text{‰}$  letztlich verschwunden ist.

Mißt man außer der Längsdehnung  $\epsilon_1$  auch die Querdehnungen  $\epsilon_2 = \epsilon_3$ , die beim Prisma und Zylinder in beiden Richtungen gleich sind, so erhält man eine mittelbare Auskunft über die innere Zerstörung. Hierzu berechnet man die Volumendehnung (Veränderung des Volumens/Anfangsvolumen), aus der man die Verdichtung und Auflockerung ablesen kann. Aus dem Verlauf der Linien konnte man, zusammen mit akustischen und optischen Meßmethoden, den Prozeß der Mikrorißbildung und den Bruchvorgang klären.

Auch der unbelastete Körper weist eine gewisse geringe Mikrorißbildung auf, die aus der Gefügeunverträglichkeit der Komponenten entsteht (Unterschiede in  $E$ ,  $\alpha_T$ , Schwinden) und die auf die Verbundzonen Korn-Matrix beschränkt ist. Bei Laststeigerung bis zur Gebrauchsspannung  $\sigma \approx 0,4$  bis  $0,5 \beta_P$  nehmen die Hafrisse langsam zu. Bei der kritischen Spannung von  $0,75$  bis  $0,90 \beta_P$  dringen die Mikrorisse, ausgehend von den Hafrissen, in die Matrix vor. Die kritische Spannung ist mit dem Wendepunkt der Volumendehnung verknüpft. Unterhalb des Wendepunktes wird der Beton verdichtet, oberhalb beginnt die Aufweitung. Ab dem Maximum der Volumendehnung bei rd.  $0,9 \beta_P$  setzt rasches und instabiles Rißwachstum ein. Nach dem Spannungsmaximum wird das Rißwachstum wieder gebremst, weil die treibende Kraft, die Spannung, entsprechend dem zur Verformung gehörenden Widerstand zurückgenommen wird.

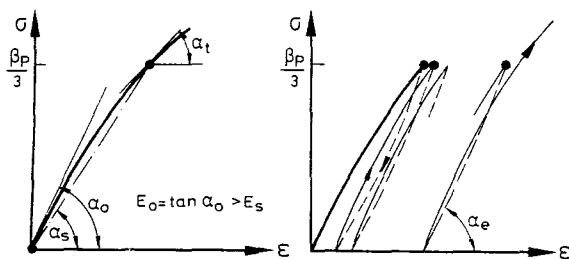
Die Spannungs-Dehnungslinie von Beton auf mittigen Zug weist bei dehngesteuerter Belastung die gleichen Züge wie bei mittigem Druck auf. Wegen des gegenüber Druckversagen veränderten Bruchmechanismus gelingt es jedoch nur unter bestimmten Bedingungen einen abfallenden Ast zu messen. Aus diesem Grunde wird die  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie von zentrischem Zug als eine Gerade mit Endpunkt Zugfestigkeit  $\beta_Z$  idealisiert.

Die Form der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie hängt von den gleichen Parametern ab, die auch ihren Gipfelwert, die Festigkeit, bestimmen: Zusammensetzung, Festigkeit und Alter (Erhärtungszustand) des Betons; Beanspruchungszustand und -geschichte sowie Umgebungsbedingungen.

#### Elastische Kennwerte

Der Elastizitätsmodul und die Querdehnzahl werden zur Berechnung der Verformungen im Gebrauchszustand von Bauteilen benötigt, die i. w. im ungerissenen Zustand verbleiben. Bereits aus der Form der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie ist abzuleiten, daß Beton kein ideal-elastischer Stoff ist, der der Beziehung (siehe Bild 5.7.46)  $E_0 = \sigma/\epsilon$  streng gehorcht. Trotzdem ist es im Bereich der Gebrauchsspannung vertretbar, ein näherungsweise elastisches Verhalten anzunehmen und dieses mit einem festen Sekantenmodul  $E_s$  – z. B. innerhalb des Spannungsbereichs von  $0$  bis  $\beta_P/3$  – zu beschreiben.

Die  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie enthält auch im Bereich  $\sigma < 0,5 \beta_P$  neben den elastischen auch zeitabhängige Verformungsanteile sowie bleibende Verformungen. Diese zuletzt genannten Effekte äußern sich als Restdehnung nach Entlastung. Durch mehrere Belastungswechsel wird ein Grenzwert der Restdehnung erreicht, und ein i. w. elastisches Verhalten tritt ein. Diese Tatsache wird zur Bestimmung des E-Moduls nach



Ursprungsmodul	$E_0$	Entlastungsmodul	$E$
Sekantenmodul	$E_s$	nach Lastwechseln	
Tangentenmodul	$E_t$	DIN 1048	

Bild 5.7.46 Druckelastizitätsmodul von Beton, Begriffe und Prüfung

DIN 1048 benutzt, der als Steigung des letzten Entlastungsastes definiert wird (Sekantenmodul).

Die Größe des E-Moduls hängt von zahlreichen Parametern ab: er nimmt mit der Zementsteinfestigkeit und mit dem Zuschlagelastizitätsmodul zu [3]. Auch das Mischungsverhältnis des Betons ist von Einfluß. Hohe Temperaturen ab +100 °C verringern, niedrige Temperaturen unter -30 °C erhöhen den E-Modul. Von großem Einfluß sind auch die Prüfbedingungen. Aus all diesen Gründen ist mit einem breiten Schwankungsbereich des Druck-E-Moduls für einen Beton bestimmter Festigkeit zu rechnen. Näherungsweise kann für Normalbeton folgende Beziehung angewandt werden:

$$E \approx 6000 \sqrt{\beta_{Wm}}$$

wobei  $\beta_{Wm}$  die mittlere Würfeldruckfestigkeit des Betons ist. Diese Beziehung ist zusammen mit den Rechenwerten von DIN 1045 in Bild 5.7.47 aufgetragen.

Der Ursprungsmodul  $E_0$  kann mit zerstörungsfreien Prüfverfahren als sogenannter dynamischer E-Modul bestimmt werden. Damit ergibt sich die Möglichkeit, den E-Modul eines Bauwerksbetons abzuschätzen. Nach [1] besteht zwi-

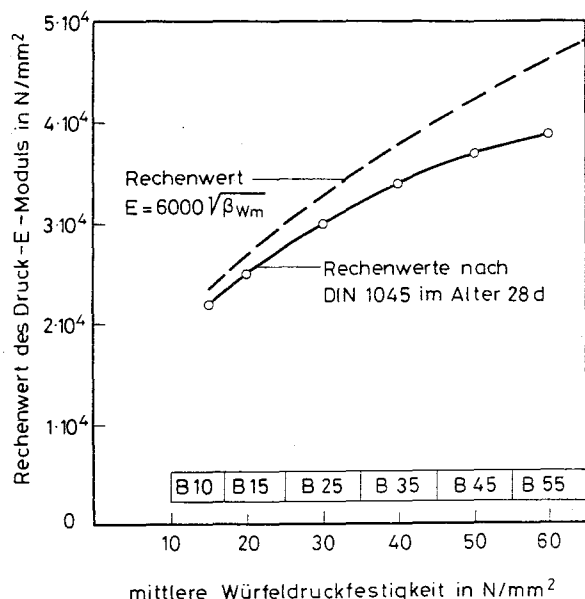


Bild 5.7.47 Rechenwerte des Druck-E-Moduls von Beton

schen dem Ursprungs- und dem Sekantenmodul folgende Beziehung:

$$E_s \approx 1,25 E_0 - 19000$$

Näherungsweise entspricht der Ursprungsmodul auch dem Zugelastizitätsmodul  $E_z$ . Genauere Werte für  $E$  und  $E_z$  sind nur durch den Versuch gewinnbar.

Die Querdehnzahl

$$\mu = \left| \frac{\epsilon_q}{\epsilon_l} \right|$$

schwankt zwischen 0,15 bis 0,25. Sie geht in die Verformungsberechnung mit untergeordnetem Gewicht ein. Ab einer Druckspannung von rd. 0,8 bis 0,9  $\beta_P$  nimmt die Querdehnzahl wegen der Gefügebauaufweitung durch innere Risse bis auf 0,5 zu.

#### Arbeitsvermögen von Beton

Die Biegebauteile aus Stahlbeton und Spannbeton werden so bemessen, daß sich ihr Versagen mit großen bleibenden Verformungen ankündigt (Warnung bei Überlastung) und ein spröder Bruch ausgeschlossen ist. Dies erfordert, daß die Baustoffe Stahl und Beton selbst ein zähes Bruchverhalten besitzen. Zur Erinnerung: zäh = duktil – hohes plastisches Arbeitsvermögen, siehe Abschn. 4.1.

Die Zähigkeit eines Baustoffs kann aus dessen  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie abgeleitet werden. Bei Belastung eines Probekörpers wird Formänderungsarbeit geleistet, die dem Produkt Kraft  $\times$  Verformung entspricht:

$$W \sim F \cdot \Delta l = A \cdot l \cdot \sigma \cdot \epsilon \quad \sigma = F/A; \epsilon = \Delta l/l$$

bzw. da die Arbeit von Anfang an zunimmt, schreibt man mit  $A \cdot l =$  Körpervolumen  $V$  [mm³]:

$$W = V \int_{\sigma}^{\epsilon} \sigma d\epsilon = V \cdot w_s$$

Aus dieser Beziehung erkennt man, daß die Formänderungsarbeit i. w. die Fläche unter der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie ist, die man spezifische Arbeit  $w_s$  nennt und die im Volumen 1 mm³ geleistet wird. Die spezifische Arbeit setzt sich i. a. aus der elastischen (bei Entlastung wiedergewinnbaren) und aus der plastischen (bei Entlastung verlorenen) zusammen:

$$w_s = w_{el} + w_{pl}$$

Die plastische Arbeit erkennt man nach Entlastung als Differenzfläche  $w_s - w_{el}$ .

In Bild 5.7.48 ist die  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie von Glas bis zum Bruch und die von Baustahl im Fließbereich dargestellt. Glas zerreißt spröde: Zum Bruch wird nur elastische und keine plastische Arbeit aufgewendet. Bei Stahl hingegen steigt nach Erreichen der Streckgrenze sowohl die Gesamtarbeit als auch die plastische Arbeit an, während die elastische Arbeit unverändert bleibt. Ist die Stahldehnung beim Versagen das 2- bis 4fache der Streckdehnung  $\epsilon_s$ , so beträgt die plastische Arbeit das 2- bis 6fache der elastischen. Das Versagen von Stahl wird sich also deutlich vorankündigen: Stahl ist ein zäher Baustoff.

Auch Beton kann prinzipiell als zäher Baustoff angesehen werden (siehe Bild 5.7.49) [45]. Dies erkennt man bereits

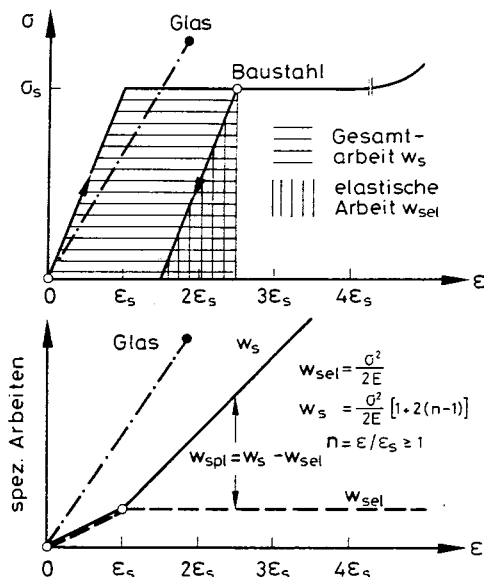


Bild 5.7.48 Arbeitsvermögen von Glas und Stahl auf Zug

am Überfahren des Spannungsmaximums und am abfallenden Ast der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie. Im Gebrauchsspannungsbereich verhält sich Beton unter Kurzzeitlast überwiegend elastisch. Die plastische Arbeit nimmt vor allem nach Überschreiten von  $\beta_P$  deutlich zu. Sie ist jener Anteil der gesamten Formänderungsarbeit, der durch Mikrorißbildung und viskose Verformungen verloren geht (Verlustrarbeit).

Der Vergleich der plastischen Arbeiten von Stahl und Beton geht deutlich zu Ungunsten von Beton aus. Dieser Vergleich muß mit definierten Baustoffen zahlenmäßig geführt werden. Ganz grob beträgt das spezifische Arbeitsvermögen von Stahl bei rd. 5% Dehnung das 20- bis 40fache von Beton bei -2%. Aber dieser Vergleich hinkt, weil es im realen Bauteil nicht auf die spezifische plastische Arbeit, sondern auf die im beanspruchten Volumen (Stahlquerschnitt bzw. Biegedruckzone) zu leistende, plastische Gesamtarbeit ankommt. Bei den üblichen Bewehrungsgraden der Praxis sind die plastischen Gesamtarbeiten von

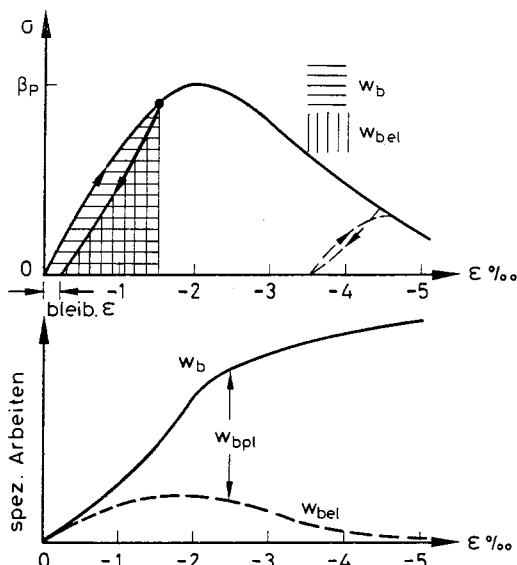


Bild 5.7.49 Arbeitsvermögen von Beton auf Druck

Stahl und Beton ungefähr gleich: Beton selbst ist ein Baustoff mäßiger, aber ausreichender Duktilität, Stahlbeton und Spannbeton sind zähe Verbundbaustoffe.

#### Einflüsse auf die Form der $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie

##### Einfluß der Zusammensetzung und Festigkeit des Betons

Stellt man Betone aus den gleichen Ausgangsstoffen mit zunehmender Festigkeit her, so wird dies bekanntlich nur mit abnehmenden W/Z-Werten möglich. Bild 5.7.50 zeigt  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien von Beton auf mittigem Druck abhängig von der Druckfestigkeit [45]. Mit Zunahme der Festigkeit nimmt die Steilheit sowohl des aufsteigenden als auch des abfallenden Astes im  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramm zu. Ebenso nimmt die Dehnung an der Zylinderdruckfestigkeit mit Zunahme der Festigkeit – wenn auch nur wenig – zu.

In Neigung und Krümmung des aufsteigenden Astes äußern sich mehrere Parameter der Zusammensetzung: Elastizität (W/Z) und Menge des Zementsteins sowie Elastizität und Menge des Zuschlags u.a. Die Neigung wird um so steiler, je kleiner der W/Z-Wert und je größer der E-Modul des Zuschlags ist. Je größer der Anteil des Zuschlags und das Größtkorn ist, um so stärker ist die Krümmung des aufsteigenden Astes, weil die Mikrorißbildung zunimmt.

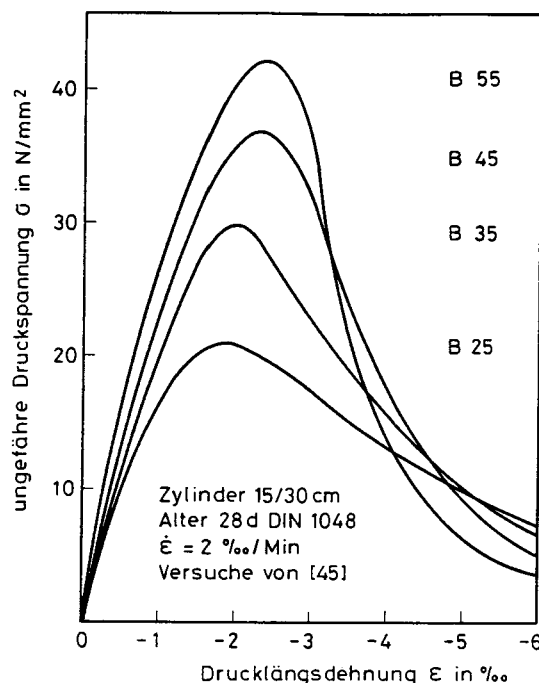


Bild 5.7.50 Einfluß der Druckfestigkeit von Beton auf die Spannungs-Dehnungs-Linie für mittigen Druck

Das Spannungs-Dehnungsdiagramm eines Betons bestimmter Festigkeit ist während der Anfangserhärtung deutlich vom Alter abhängig [17] [30]. Im jungen Alter findet eine rasche Veränderung der mechanischen Eigenschaften statt: Übergang von Viskosität zu Viskoelastizität.

##### Einfluß der Beanspruchungsgeschwindigkeit

In Bild 5.7.51 sind Spannungs-Dehnungslinien von einachsig gedrücktem Beton bei unterschiedlichen Dehn- und Spannungsgeschwindigkeiten dargestellt. Je höher die

Dehngeschwindigkeit ist, um so höher ist die Festigkeit, um so steiler fällt der absteigende Ast ab und um so kleiner ist die Bruchdehnung. Im Bereich der Gebrauchsspannungen  $\sigma \leq 0,4$  bis  $0,5 \beta_P$  spielt die Größe von  $\dot{\epsilon}$  fast keine Rolle. Aus der Vielzahl dieser Linien wurde das Parabel-Rechteck-Diagramm der DIN 1045 als idealisierte  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie für die Bauteilbemessung entwickelt.

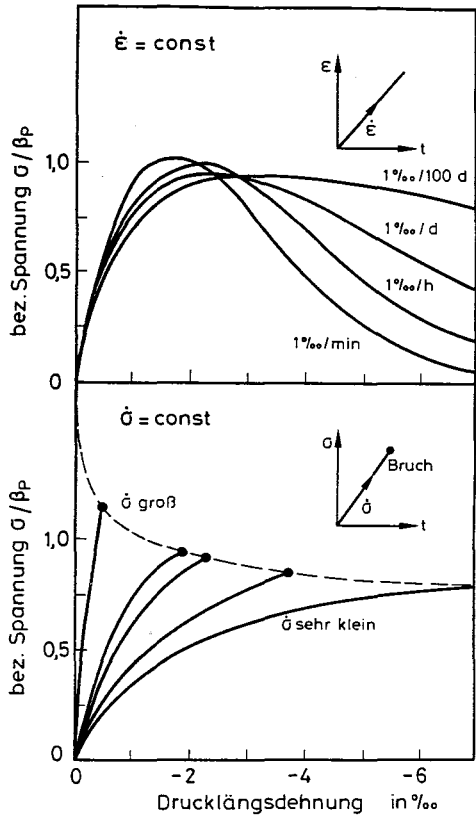


Bild 5.7.51 Einfluß der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die Spannungs-Dehnungslinie von Beton auf mittigen Druck

Auch bei konstanter Spannungsgeschwindigkeit gelten die o.a. Aussagen, wobei daran erinnert wird, daß das Spannungsmaximum nicht überfahren werden kann. Bei abnehmender Spannungsgeschwindigkeit gewinnt die Dauerstandwirkung an Einfluß.

Die Abhängigkeit der Spannungsdehnungsline von der Zeit ergibt sich aus der Viskoelastizität des Zementsteins und über die Mikrorißbildung. Sowohl zur Aktivierung der viskosen Verformungskomponente des Zementsteins als auch zur Rißfortpflanzung ist Zeit erforderlich. Je schneller die Beanspruchungsgeschwindigkeit ist, um so steiler ist der aufsteigende Ast und um so geringer ist seine Krümmung. Dies wird beim zentrischen Zug besonders deutlich, wie Bild 5.7.52 zeigt. Nur bei sehr geringer Dehngeschwindigkeit und nur bei jungem Beton (hohes viskoses Verformungsvermögen) kann bei mittigem Zug das Spannungsmaximum überfahren werden. I.d.R. tritt das Versagen an der Höchstspannung  $\beta_Z$  ein. Zugfestigkeit und Bruchdehnung steigen mit Zunahme der Spannungsgeschwindigkeit an [37] [38].

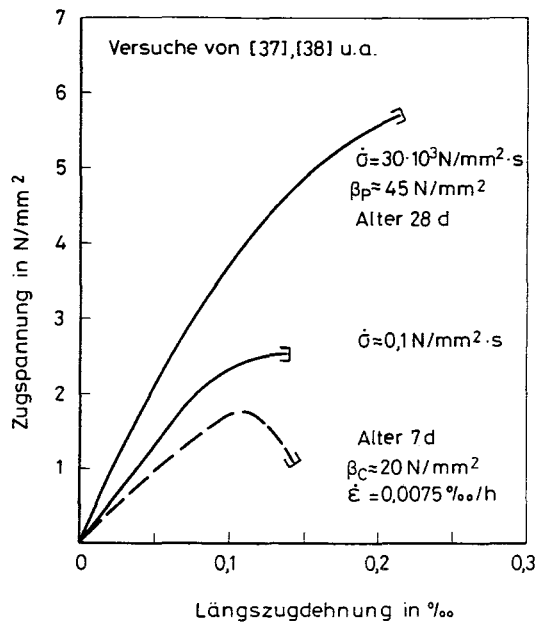


Bild 5.7.52 Einfluß der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die Spannungs-Dehnungsline von Beton auf mittigen Zug

#### Einfluß mehrachsiger Spannung

Im Vergleich zum einachsigen Druck  $\sigma_1/\sigma_2 = -1/0$  nimmt bei Hinzutreten einer Druckspannung  $\sigma_2$  die Steilheit des aufsteigenden Astes und die Dehnung unter der anwachsenden, zweiachsigen Festigkeit zu. Tritt zur Druckspannung  $\sigma_1$  eine Zugspannung  $\sigma_2$  hinzu, so versprödet der Beton. Bild 5.7.53 zeigt diese Zusammenhänge [33], die mit dem gegenüber der einachsigen Druckbeanspruchung veränderten Mikrorißwachstum erklärt werden können. Bei einer dreiachsigen Druckbeanspruchung, bei der zur Druckspannung  $\sigma_2$  noch eine gleich große  $\sigma_3$  hinzutritt,

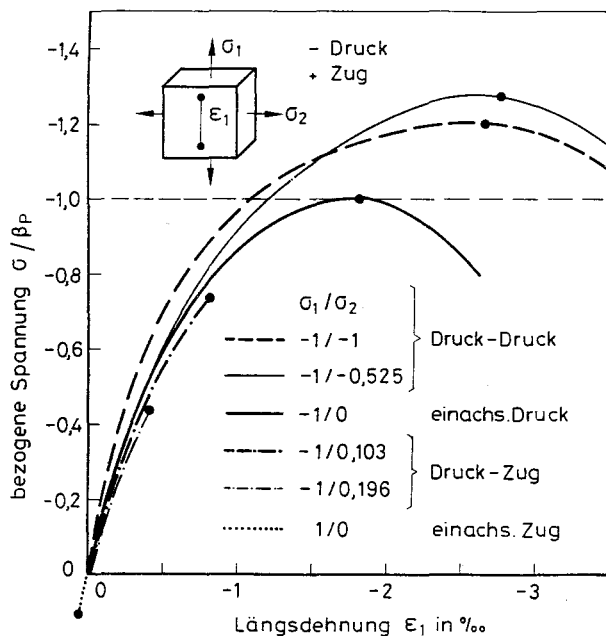


Bild 5.7.53 Spannungs-Dehnungsline bei zweiachsiger Beanspruchung nach [33]



nimmt sowohl die aufnehmbare Spannung  $\sigma_1$  als auch die Längsdehnung  $\epsilon_1$  beträchtlich zu. Ein Überblick über die dreiachsige Beanspruchung ist in [34] enthalten.

#### Einfluß hoher und tiefer Temperaturen

Hohe Temperaturen ab rd.  $+100^\circ\text{C}$  führen aus den bereits geschilderten Gründen zur Verweichung des Betons, wie Bild 5.7.54 zeigt. Die Prüfkörper waren vor dem Aufheizen unbelastet und konnten frei austrocknen [42].

Tiefe Temperaturen versteifen den Beton und zwar um so mehr, je höher die Betonfeuchte bei Beginn der Abkühlung ist, siehe Bild 5.7.55. Mit abnehmender Temperatur nimmt bei hoher Betonfeuchte die Dehnung unter der Zylinderfestigkeit zwischen  $+20^\circ\text{C}$  und rd.  $-80^\circ\text{C}$  zu; danach nimmt sie wieder stetig ab. Ab rd.  $-120^\circ\text{C}$  ist der Beton zunehmend linear-elastisch und spröde. Allerdings fällt die Dehnung an der Zylinderfestigkeit nicht unter den bei Raumtemperatur gemessenen Wert von rd.  $-2\text{‰}$  [44].

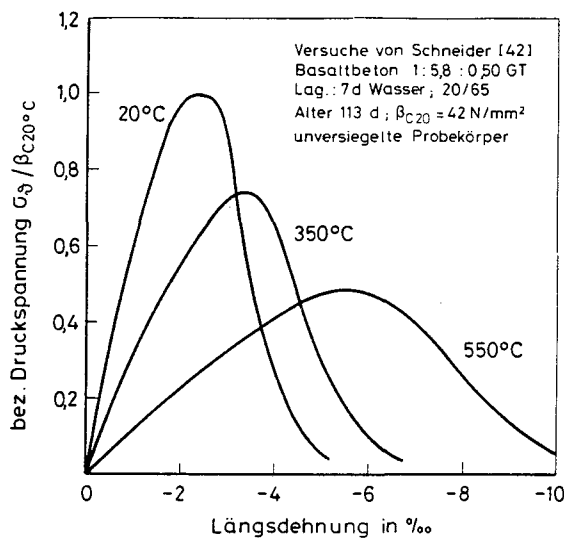


Bild 5.7.54 Einfluß hoher Temperaturen auf die Spannungs-Dehnungslinien von Beton auf mittigen Druck

#### 5.7.7.3 Kriechen unter Dauerlast und Spannungsrelaxation

##### Überblick

Das Kriechen des Betons unter den Dauerspannungen der ständig wirkenden Lasten ist eine spannungs- und zeitabhängige Verformung, Kriechdehnung genannt, die das gleiche Vorzeichen wie die elastische Dehnung infolge der Dauerspannung besitzt, aber im Laufe der Jahre den bis zu 4fachen Betrag der elastischen Dehnung annehmen kann. Neben der oft beträchtlichen Zunahme der Verformungen von Bauteilen führt das Kriechen zum Abbau der Vorspannung in Spannbetonbauteilen.

Das Kriechen hängt unmittelbar mit dem viskoelastischen Verhalten des Zementsteins zusammen. Die physikalischen Ursachen des Kriechens von Zementstein und der Relaxation wurden ebenso wie die Bestandteile der Kriechdehnung und deren zeitlicher Verlauf bereits in Abschnitt 5.6 erläutert. Hier werden nur jene Einflüsse angesprochen, die

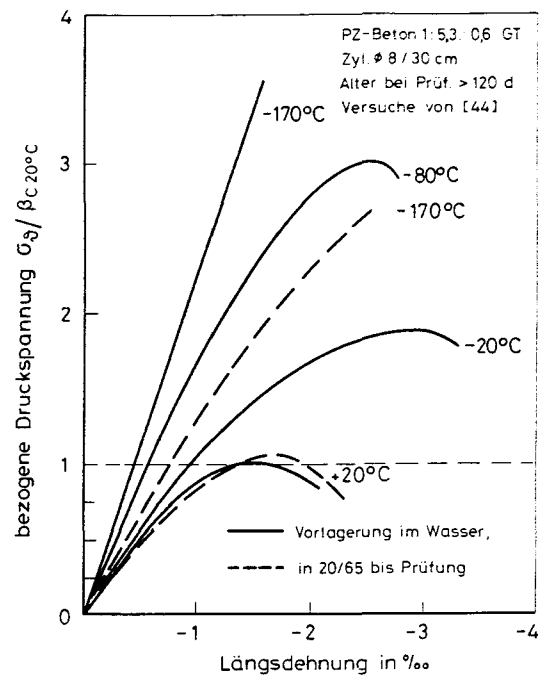


Bild 5.7.55 Einfluß tiefer Temperaturen auf die Spannungs-Dehnungslinien von Beton auf mittigen Druck

von der Betonzusammensetzung und von den Bauteilabmessungen herrühren. Dabei ist die Erklärung der Begriffe wirksame Körpergröße und wirksames Alter in Abschnitt 5.7.7.4 »Schwinden« zu finden, wo sie im Zusammenhang mit der Trocknung definiert werden.

Beton kriecht sowohl unter Druckspannung als auch unter Zugspannung. Für die Praxis besitzt das Druckkriechen die größere Bedeutung, so daß die folgenden Erläuterungen nur davon handeln. Bei konstanter Spannung strebt das Kriechen mit abnehmender Geschwindigkeit der Endkriechdehnung  $\epsilon_{k\infty}$  zu, die ebenso wie der zeitliche Verlauf von zahlreichen Einflüssen abhängt [47, 48, 13]:

##### a) Einflüsse der Ausgangsstoffe und der Betonzusammensetzung

Das Kriechen nimmt zu bei

- Zunahme der Mahlfinheit des Zements,
- Anstieg des Zementgehalts,
- Zunahme des W/Z-Werts und der Wassermenge,
- Zunahme der Betonfeuchte im Gleichgewichtszustand,
- Abnahme des E-Moduls und der Menge des Zuschlags,
- Abnahme des Alters bei erster Belastung,
- Abnahme der Festigkeit bei erster Belastung.

##### b) Umweltbedingungen

Das Kriechen nimmt zu bei

- abnehmender relativer Luftfeuchte,
- Temperaturzunahme,
- allen sonstigen Umständen, die zu erhöhter Austrocknung führen (gleichzeitige Trocknung überhöht das Kriechen).

##### c) Bauteilabmessungen

Die Kriechdehnung nimmt mit abnehmender wirksamer Körperdicke zu (Beziehung zum Trocknen und Schwinden,

wobei vereinfachend angenommen wird, daß Kriechen und Schwinden voneinander unabhängig ablaufen).

#### Kriechdehnung und Kriechzahl

Zusätzlich zu den vorgenannten Einflüssen nimmt die Kriechdehnung  $\epsilon_k$  mit Zunahme der Dauerspannung  $\sigma_0$  zu. Diese Zunahme ist bis rd. 0,4  $\beta_P$  direkt proportional zur Spannung und damit auch direkt proportional zur elastischen Verformung infolge  $\sigma_0$ :

$$\epsilon_k(t, t_0) = \epsilon_{el}(t_0) \cdot \varphi(t, t_0) = \frac{\sigma_0}{E_0} \cdot \varphi(t, t_0)$$

Hierin bedeuten:  $t_0$  das Alter bei Belastung,  $t$  das Alter, an dem die Kriechdehnung bestimmt werden soll, und  $\varphi(t, t_0)$  ist die Kriechzahl.  $E_0$  ist der Druckelastizitätsmodul im Alter  $t_0$ , der vereinfachend als zeitunabhängig angenommen wird.

Die Endkriechdehnung beträgt dann:

$$\epsilon_k(\infty, t_0) = \epsilon_{k\infty} = \frac{\sigma_0}{E_0} \cdot \varphi(\infty, t_0) = \frac{\sigma_0}{E_0} \cdot \varphi_\infty$$

Bild 5.7.56 zeigt die Endkriechzahl in Abhängigkeit vom Erstbelastungsalter  $t_0$ , von der Umgebungsfeuchte und wirksamen Körperdicke.

Bei dieser Beschreibung des Kriechens wurden die beiden Verformungskomponenten des Kriechens, die verzögerte Elastizität und das Fließen, gemeinsam erfaßt. Unterscheidet man nach diesen, so lautet die Kriechzahl:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_v(t - t_0) + \varphi_f(t, t_0)$$

oder als Kriechdehnung ausgedrückt:

$$\epsilon_k(t, t_0) = \epsilon_v(t - t_0) + \epsilon_f(t, t_0)$$

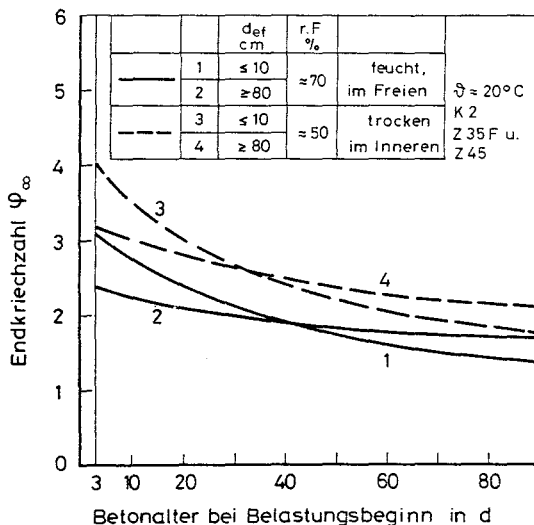


Bild 5.7.56 Endkriechzahlen nach DIN 4227, Bl. 1

#### Der zeitliche Ablauf des Kriechens

Der zeitliche Ablauf der verzögert-elastischen Verformung hängt nicht vom Belastungsalter, sondern nur von der Zeit  $t - t_0$  unter Last ab. Man drückt sie mit Bild 5.7.57 wie folgt aus:

$$\epsilon_v(t - t_0) = \varphi_{v\infty} \cdot k_v(t - t_0) \cdot \epsilon_{el}; \varphi_{v\infty} \approx 0,4; 0 \leq k_v \leq 1$$

Entlastet man nach Bild 5.6.21 den Probekörper zum Zeitpunkt  $t_e$ , so ist bis dahin entstanden:

$$\epsilon_v(t_e - t_0) = 0,4 k_v(t_e - t_0) \cdot \epsilon_{el}$$

Ab dem Zeitpunkt  $t_e$  federt diese Dehnung verzögert-elastisch auf null zurück. Die verzögert-elastische Verformung ist reversibel.

Der Fließanteil des Kriechens ist nach [N 7] mit  $\varphi_{f0}$ , der vom Umgebungsklima abhängigen Grundfließzahl,

$$\epsilon_f(t, t_0) = \varphi_{f0} [k_f(t) - k_f(t_0)] \cdot \epsilon_{el}$$

wobei  $k_f$  die Zeitfunktion des Fließens darstellt, die von der wirksamen Körperdicke abhängt. Durch die Differenz in der Klammer wird der Einfluß des Alters bei Belastung erfaßt. Beton hat ein gewisses Fließpotential, das um so größer ist, je jünger er bei Erstbelastung ist. Wird also ein Körper bei  $t_0$  belastet, so steht bis  $t$  nur das Restfließpotential entsprechend der Altersdifferenz  $t - t_0$  zur Verfügung, und das Potential von einem Tag (denkbar jüngstes Belastungsalter) bis  $t_0$  ist durch Altern verloren.

Entlastet man den Körper zum Zeitpunkt  $t_e$ , so ist, wie Bild 5.6.21 zeigte, die bis dahin entstandene Fließdehnung

$$\epsilon_f(t_e, t_0) = \varphi_{f0} [k_f(t_e) - k_f(t_0)] \cdot \epsilon_{el}$$

Sie ist irreversibel.

Bei veränderlichen Druckspannungen wendet man das Superpositionsprinzip (Überlagerungs-) an. Jede neue Spannungsstufe  $\Delta\sigma_i$  beginnt im Alter  $t_i$  und erzeugt bis zum

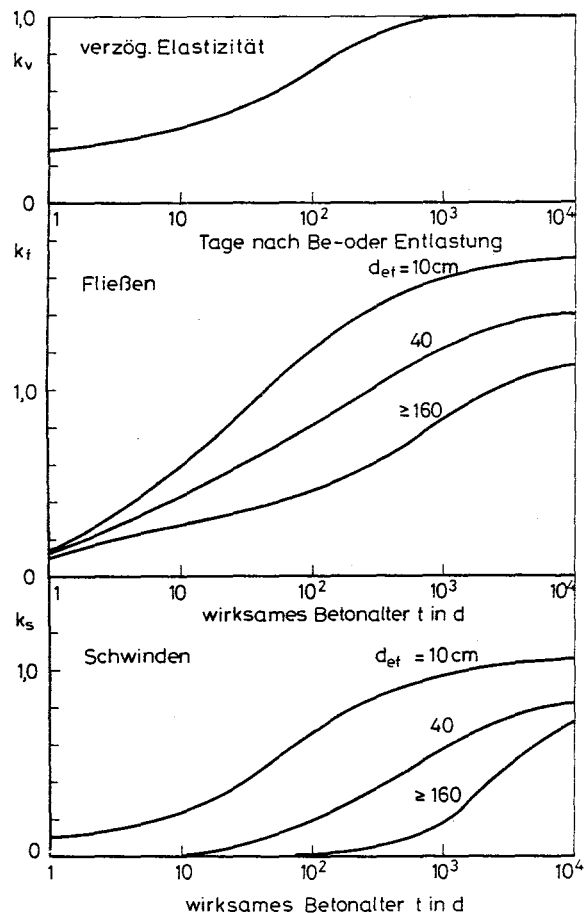


Bild 5.7.57 Zeitverläufe der verzögert-elastischen, der Fließ- und der Schwindverformung nach DIN 4227 (Auszug)

Zeitpunkt ihre eigene Kriechdehnung  $\Delta \varepsilon_{ki}$ . Die gesamte Kriechdehnung ergibt sich als Summe der Teilkriechdehnungen [13].

### Spannungsrelaxation

Die Spannungsrelaxation (Spannungsabbau unter aufgezwingener Verformung) wird wie das Kriechen durch die Viskoelastizität des Zementsteins verursacht. Kriechen ist die Verformungsantwort auf eine aufgezwungene Spannung, und Relaxation ist die Spannungsantwort auf eine aufgezwungene Dehnung.

Die Relaxation wird mit Bild 5.7.58 an einem Beispiel erläutert: ein Betonstab, dessen Enden unverrückbar gestützt sind, wird plötzlich erwärmt und möchte sich um  $\Delta l$  verlängern. Dies wird aber durch die Stützung verhindert, und es baut sich spontan eine Zwangsspannung

$$\sigma_{zo} = - \frac{\Delta l}{l_0} \cdot E_0$$

auf. Sie ist eine Druckspannung, weil ja die angestrebte freie Verlängerung  $\Delta l$  gleichsam um das gleiche Maß zurückgedrückt werden mußte. Die Anfangszwangsspannung bleibt aber nicht stehen, sondern wird durch die Relaxation abgebaut. Analog zum Kriechen ist dies mit

$$\sigma_z(t, t_0) = \sigma_{zo} [1 - \Psi(t, t_0)]$$

ausdrückbar, wobei  $\Psi(t, t_0)$  die Relaxationszahl ist. Diese hängt grob vereinfacht mit der Kriechzahl zusammen:

$$\Psi(t, t_0) \approx \frac{\varphi(t, t_0)}{1 + \varphi(t, t_0)}$$

Der Spannungsabbau nimmt in dem Maß zu wie das Kriechen: Alle Einflüsse, die das Kriechen erhöhen, verstärken auch die Relaxation. Die Spannungsrelaxation ist eine sehr wohltätige Betoneigenschaft, die den Abbau von Zusatzspannungen infolge Schwinden, Abkühlen und infolge von Setzung bewirkt.

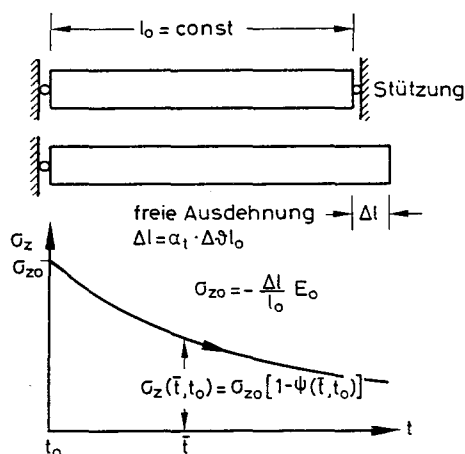


Bild 5.7.58 Relaxation einer thermischen Zwangsspannung von Beton, Beispiel

### 5.7.7.4 Schwinden

#### Überblick

Die lastunabhängigen Langzeitverformungen Schwinden bzw. Quellen werden vom Zementstein verursacht und hängen unmittelbar mit dem Wasserverlust durch Austrocknen bzw. mit der Wasseraufnahme bei Befeuchtung zusammen. Die physikalischen Ursachen des Schwindens von Zementstein wurden bereits besprochen, so daß hier nur jene Einflüsse behandelt werden, die von der Betonzusammensetzung und von den Bauteilabmessungen herrühren. Das Schwinden ist eine allseitige gleiche Volumenverminderung, die dem Endschwindmaß zustrebt. Folgende Einflüsse bestimmen das Schwinden:

#### a) Einflüsse der Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung

Das Schwinden nimmt zu bei

- feingemahlten Zementen,
- steigendem Zementgehalt,
- Zunahme des W/Z-Werts und der Wassermenge,
- Verwendung von Zuschlag mit kleinem E-Modul und bei
- Abnahme der Zuschlagmenge,
- Abnahme des Alters bei Trocknungsbeginn.

#### b) Umweltbedingungen

Das Schwinden steigt an bei

- abnehmender relativer Luftfeuchte,
- zunehmender Temperatur,
- Wind und bei
- Sonneneinstrahlung.

Je kleiner die Bauteilabmessungen sind, um so rascher laufen Austrocknung und Schwinden ab und um so größer ist das Endschwindmaß.

#### Einflüsse der Betonzusammensetzung

Das Schwinden nimmt, s. Bild 5.7.59, mit Zunahme des Zement- und des Anmachwassergehalts zu, weil damit die schwindfähige Masse ansteigt. Gleichzeitig übt der Wasserzement-Wert einen großen Einfluß aus, weil mit Anstieg von W/Z bei festem Zementgehalt die Porosität des Zementsteins und die durch Trocknung austreibbare Wassermenge  $W - W_g$  zunimmt [16, 32]: Große W/Z-Werte ziehen großes Schwinden nach sich.

Der Zuschlag schwindet nicht, sondern behindert das Schwinden des Zementsteins. Diese Behinderung zeigt sich in folgender Beziehung zwischen dem Schwindmaß des Betons  $\varepsilon_s$  und dem des Zementsteins  $\varepsilon_{s, st}$ :

$$\varepsilon_s(t) = \varepsilon_{s, st}(t) (1 - v_k)^n$$

Hierin ist  $v_k$  der Stoffraumanteil des Zuschlags, der rd. 0,65 bis 0,80 beträgt;  $n$  ist eine Konstante, die vom Verhältnis  $E_k/E_{st}$  abhängt und die sich zwischen 1,2 bis 1,8 bewegt. Durch den Zuschlag wird das Schwinden des Betons auf rd. das 0,1- bis 0,2fache des Zementsteins reduziert. Dabei entstehen aber im Betoninneren Gefügespannungen (innerer Zwang), die zu Mikrorissen im Zementstein führen können. Aus diesem Grund und weil der Zementstein ein altersabhängiger, viskoelastischer Stoff ist, ist das Schwinden größtenteils, auch bei anschließender Wasserlagerung, nicht umkehrbar.

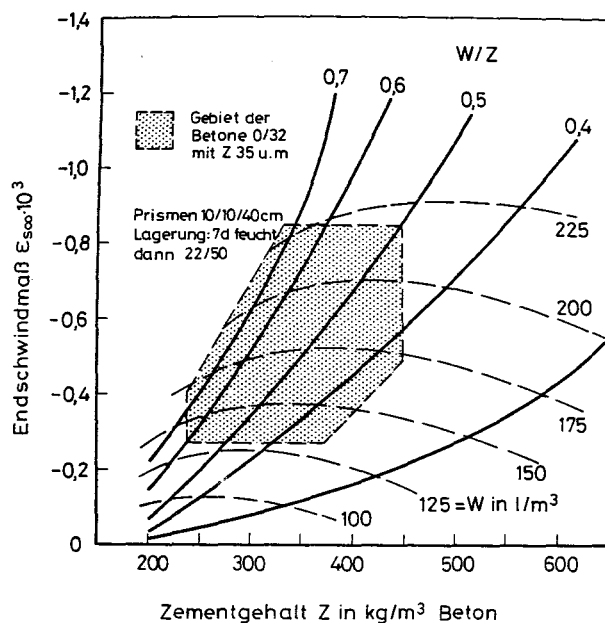


Bild 5.7.59 Endschwindmaße von Beton nach [16] abhängig von W, Z und W/Z

#### Einfluß der Umgebungsbedingungen

Zwischen dem Schwinden und dem Wasserverlust durch Trocknen herrscht ein proportionaler Zusammenhang [32]. Dementsprechend sind – wie in Bild 5.7.60 gezeigt – die Endschwindmaße um so größer, je niedriger die relative Luftfeuchte ist. Bauteile in sehr feuchter Luft schwinden nur wenig, bei Wasserlagerung findet ein Quellen von rd.  $\epsilon_{q\infty} \approx +0,1\%$  statt.

Das Endschwindmaß nimmt bei geringer werdendem Alter bei Trocknungsbeginn und bei abnehmenden Körperabmessungen, ausgedrückt durch die wirksame Körperdicke, zu. Beide Effekte sind mit dem irreversiblen Anteil der Schwindverformungen im jungen Alter zu erklären.

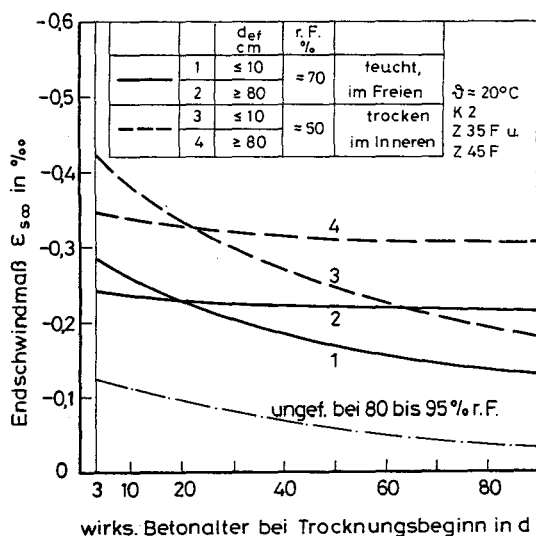


Bild 5.7.60 Endschwindmaße nach DIN 4227, Bl. 1

#### Einfluß der Bauteilabmessungen

Die an einem Betonkörper gemessene Schwinddehnung, z. B. das Schwindmaß in Achse eines Prismas, ist von der

Körpergröße abhängig und damit keine wahre Verformungsgröße. Das Schwindmaß ist der Mittelwert der Schwinddehnungen über den Querschnitt und proportional zum Trocknungsverlust  $\Delta W$  des ganzen Prismas. Weil bekanntlich ein großer Körper langsamer austrocknet als ein kleiner, bestimmen die Körperabmessungen den Ablauf des Schwindens und dessen Endschwindmaß. Der Einfluß der Bauteilabmessungen kann durch das Verhältnis  $2 V/O$  (Volumen  $V$ ; Oberfläche  $O$ , über die die Trocknung erfolgt) beschrieben werden. Dieses Verhältnis kann als wirksame Körperdicke  $d_{ef}$  aufgefaßt werden, mit der das Austrocknungsverhalten eines Körpers beliebiger Form und Größe auf das einer beidseitig austrocknenden Platte der Dicke  $d_{ef}$  zurückgeführt wird:

$$d_{ef} = \frac{2 V}{O}$$

Beispiel:

Stütze  $0,4 \times 0,4 \times l$  [m]  $\rightarrow V = 0,4^2 \cdot l$ ;  $O = 4 \cdot 0,4 \cdot l$ ;  $d_{ef} = 0,20$  m  
 Platte  $d = 0,20$  m,  $\rightarrow V = 0,2 \cdot A$ ;  $O = 2 A$ ;  $d_{ef} = 0,20$  m  
 Fläche  $A$

Die wirksame Körperdicke wird in [N 7] mit  $2 \cdot$  Querschnittsfläche/Umfang definiert, was aber dasselbe ist wie  $2 V/O$ . Außerdem wird  $d_{ef}$  je nach Umgebungsklima zusätzlich verändert.

#### Zeitlicher Ablauf des Schwindens

In Bild 5.7.57 ist der zeitliche Ablauf des Schwindens für unterschiedliche wirksame Körperdicken dargestellt. Es gilt in Abhängigkeit vom wirksamen Betonalter  $t$  und bei Beginn im Alter  $t_0$  für eine bestimmte wirksame Körperdicke:

$$\epsilon_s(t, t_0) = \epsilon_{s\infty} \cdot [k_s(t) - k_s(t_0)]$$

Auf diese Weise wird das Alter bei Trocknungsbeginn berücksichtigt. Bei Erhärtung bei  $+20^\circ\text{C}$  entsprechen die Alter  $t$  und  $t_0$  den wahren Werten. Bei anderen Temperaturen ist die Saulsche Regel anzuwenden.

#### Folgen des Schwindens

Die Folgen des Schwindens sind vielfältig und müssen bei Planung und Ausführung bedacht werden. Durch Schwinden entstehen

- stets Eigenspannungen im Querschnitt (außen Zug, innen Druck), die zu feinen Oberflächenrissen führen können,
- Bauteilverkürzungen, deren Behinderung Zwang und oft breite Risse verursacht, und
- zusätzliche Verformungen im Querschnitt, die unliebsame Verkrümmungen erzeugen, sowie
- Verluste an Vorspannkraft.

Durch betontechnologische, planerische und konstruktive Gegenmaßnahmen (s. Abschnitt 5.6, 5.7.5.5 und [51]) ist es möglich, Schäden zu vermeiden.

#### 5.7.7.5 Wärmedehnverhalten

Beton erfährt infolge Hydratationswärme und Temperaturänderungen Temperaturdehnungen, die zu Verformungen bzw. bei deren Behinderung zu Zwang und Eigenspannungen führen. Zahlreiche Rißschäden beruhen hierauf.

Nach DIN 1045 darf die mittlere Wärmedehnung eines Bauteils mit einer festen Wärmedehnzahl  $\alpha_t$  berechnet werden:

$$\epsilon_\theta = \alpha_t \Delta \theta$$

$$\alpha_t \approx 10 \cdot 10^{-6} / \text{K}$$

Tatsächlich schwankt die Wärmedehnzahl im weiten Bereich. Sie wird in erster Linie von der Wärmedehnzahl des Zuschlags bestimmt. Der Zementstein, der rd. 30% des Raums einnimmt, übt vor allem über seinen Feuchtegehalt einen Einfluß aus.

Die thermische Dehnung der Betonkomponenten bei Plus-temperaturen ist in Bild 5.7.70, die von Betonen in Bild 5.7.61 dargestellt. Die Zuschlagart ist von großem Einfluß. Die ab rd. 150 °C einsetzende Kontraktion des Zementsteins zeigt dessen Entwässerung an.

Das Temperaturdehnverhalten von Beton bei tiefen Temperaturen zeigt Bild 5.7.62. Beton geringer Feuchte zieht sich, ebenso wie Spann- oder Betonstahl, bei Temperaturabnahme in linearer Weise zusammen, d.h. die Wärmedehnzahl ist ungefähr konstant. Nasse Betone zeigen ein völlig anderes Verhalten. Zwischen -20 °C und -60 °C wird eine Expansion infolge Eisbildung in den Feinporen beobachtet [44]. Nach einem Temperaturzyklus bleibt eine irreversible Restdehnung  $\epsilon_{bl}$  zurück, die den Frostschaden ankündigt und die mit jedem Zyklus zunimmt.

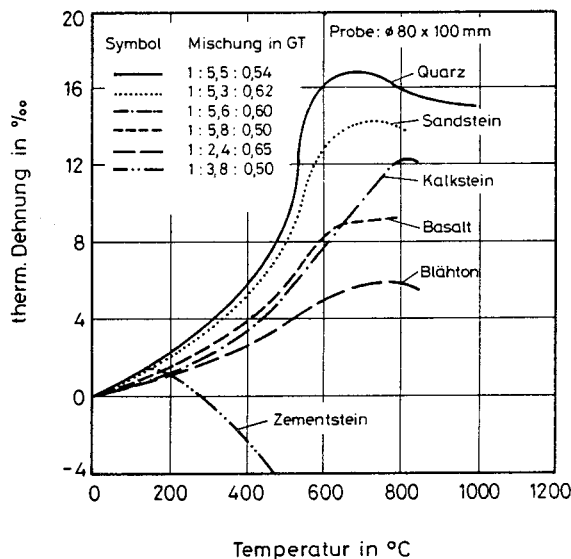


Bild 5.7.61 Thermische Dehnung von Beton bei erhöhten Temperaturen abhängig von der Zuschlagart [42]

## 5.7.8 Dauerhaftigkeit von Beton

### 5.7.8.1 Bautechnische Bedeutung, Begriffe

Unter Dauerhaftigkeit versteht man den Widerstand von Baustoffen und Bauteilen gegen die vielfältigen Angriffe aus Umwelt und Nutzung. Diese Angriffe, die mechanischer, physikalischer und chemischer Herkunft sind, können zu Zerstörungen von unterschiedlichem Ausmaß führen und Aussehen, Funktion und Tragfähigkeit der Bauteile beeinträchtigen. Diese Erklärung für die Dauerhaftigkeit ist bau-

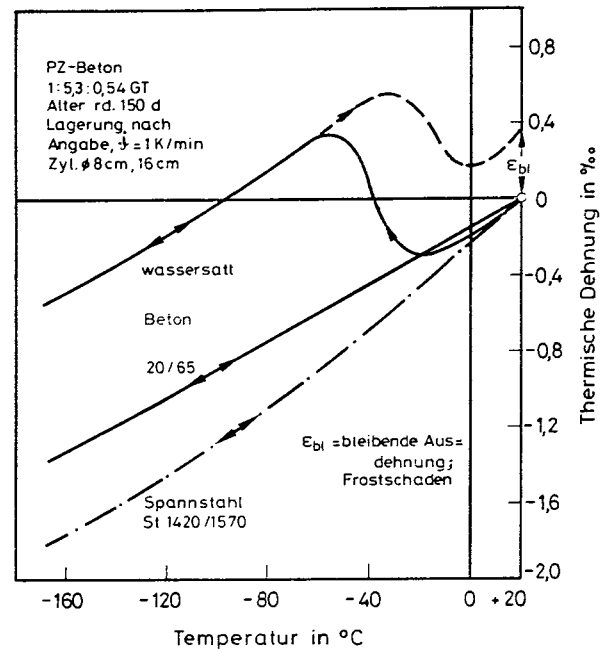


Bild 5.7.62 Thermische Dehnung von Beton und Spannstahl bei tiefen Temperaturen

stoffunabhängig und bei metallischen Baustoffen gleichbedeutend mit dem Korrosionswiderstand.

Sorgfältig ausgeführte Betonbauwerke stehen im berechtigten guten Ruf, dauerhafter als Stahlbauwerke zu sein, die stets eines passiven Schutzes bedürfen. Gleichwohl stellt man an Betonbauwerken, die der Witterung ausgesetzt sind, zunehmend Schäden unterschiedlichster Art fest. Die Gründe hierfür sind vielfältig. Zum einen hat in den vergangenen Jahrzehnten die Intensität des äußeren Angriffs zugenommen: vermehrte Luftverschmutzung, starker Tausalzeinsatz. Zum anderen wurde die dem Beton innewohnende Schutzwirkung bisweilen überschätzt; durch sie können Mängel in Planung, Stoffwahl und Ausführung nur begrenzt abgefangen werden.

### 5.7.8.2 Beanspruchungen und Wirkungen

Zur Stoffwahl, konstruktiven Durchbildung oder zur Wahl einer Schutzmaßnahme müssen die künftigen Beanspruchungen des Betonbauteils abgeschätzt werden. Die Beanspruchungen kann man in

- Beanspruchungen infolge Nutzung, Betrieb und in
- Beanspruchungen infolge Umwelteinflüsse unterteilen.

Eine scharfe Trennung zwischen den Einflüssen aus Nutzung und Umwelt ist oft weder möglich noch sinnvoll. Fast immer tritt eine komplexe Wirkung auf. Aus diesem Grunde wird zur Beschreibung der Beanspruchungen die Systematik von Tab. 5.7.12 gewählt.

Unter mechanischer Beanspruchung werden die Spannungen infolge äußerer Lasten und Zwänge verstanden. Sie sind häufig von den Spannungen infolge physikalischer Ursache nicht abgrenzbar. Ihre gemeinsame Wirkung, nämlich die Risse, stellen zusätzliche Flächen für Frost- und chemischen Angriff zur Verfügung. Korrosion, im vergleich-

Tab. 5.7.12 Überblick über Beanspruchungen von Betonbauwerken

Beanspruchungs-			
Art	Ursache	Herkunft	Wirkung
mechanisch	mechanische Spannungen in Mikro- und Makrobereichen des Stoffs	Lasten, Zwänge, Eigenspannungen aus Nutzung und Klima Eigen-, Gefügespannungen aus Herstellung, Formung, Fügen und Klima	Mikro- und Makrorisse in Gefüge und Bauteil
		Erosion	Stoffabtrag, Zerrüttung
physikalisch	Änderungen von Temperatur und Feuchte von Umgebung und Stoff	mechanische Spannungen phys. Ursache aus Nutzung und Klima	Mikro- u. Makrorisse in Gefüge und Bauteil, Gefügeänderungen und -zerrüttung, Frostabplatzung
chemisch	angreifende Stoffe von außen in Gasen und Flüssigkeiten zerstörende Stoffe und Reaktionen im Gefüge	Nutzung und Klima	elektrochemische Metallkorrosion (-auflösung)
		Stoffzusammensetzung und -paarung	lösende und treibende Zerstörung des Betons
biologisch	Pflanzen Mikroorganismen	Wurzeln Bakterien	Risse, lösende und treibende Zerstörung des Betons

baren Sinn wie die Metallkorrosion, erzeugt der chemische Angriff, weswegen nur bei diesem von Betonkorrosion gesprochen wird. Der biologische Angriff ist meist von untergeordneter Bedeutung.

### 5.7.8.3 Durchlässigkeit von Zementstein und Beton

#### Vorbemerkungen

Die genannten Beanspruchungen führen nur dann zu zerstörenden Wirkungen, wenn es der von außen zugeführten Feuchte sowie den Schadstoffen in Lösung oder in Gasphase gelingt, in Poren und andere Fehlstellen einzudringen. Die Durchlässigkeit des Betongefüges wird damit zur bestimmenden Eigenschaft der Dauerhaftigkeit von Beton.

Durchlässigkeit und Porosität hängen eng zusammen, wobei unter Porosität die Gesamtheit jener Poren und sonstigen Hohlräume verstanden wird, die sowohl untereinander zusammenhängen als auch mit der Umgebung in Verbindung stehen (offene Porosität). Die Porosität wird gebildet durch:

- Gel-, Kapillarporen, Luft- und Grobporen des Zementsteins (s. Abschnitt 5.6 und Bild 5.6.5),
- strukturelle Poren und Fehlstellen wie z. B. Mikrorisse im Beton,
- Poren des Zuschlags.

In Bild 5.7.63 ist eine schematische Darstellung der Poren und Fehlstellen gezeigt.

#### Durchlässigkeit von Zementstein

Die Gel- und Kapillarporosität (einschließlich natürlicher und künstlicher Luftporen) ist in Abschnitt 5.6 bereits behandelt worden. Die Gelporen besitzen so geringe Querschnitte, daß sie weder von Flüssigkeiten noch von Gasen durchströmt werden können. Damit wird die Durchlässigkeit von

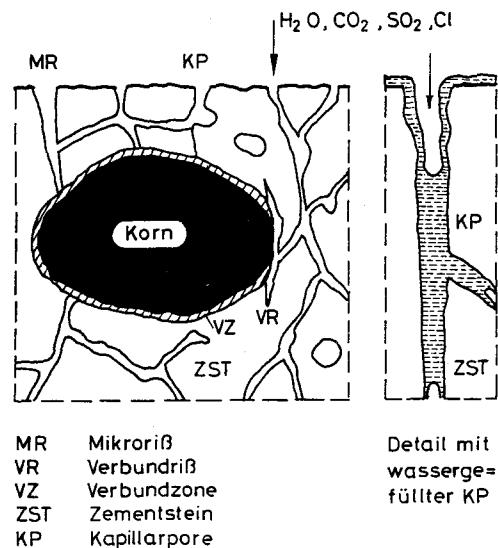


Bild 5.7.63 Kapillarporen und Fehlstellen an Betonoberfläche (schematisch)

Zementstein nur von den 100 bis 1000 mal größeren Kapillarporen bewirkt, die ein zusammenhängendes Raumnetz bilden. Die Kapillarporosität  $p_k$  ist eine Funktion des Wasserelementwerts  $w$  und des Hydratationsgrads  $m$ :

$$p_k = \frac{w - 0,40 m}{w - 0,32} 100 \text{ [Vol.-%]}$$

Sie hängt mit der Durchlässigkeit nach Bild 5.7.64 zusammen. Die hier aufgetragene Durchlässigkeitszahl gilt für die Sickerströmung nach Abschnitt 4.3.5.4. In der unteren Bildhälfte ist die Kapillarporosität nach der o. a. Beziehung ausgewertet.

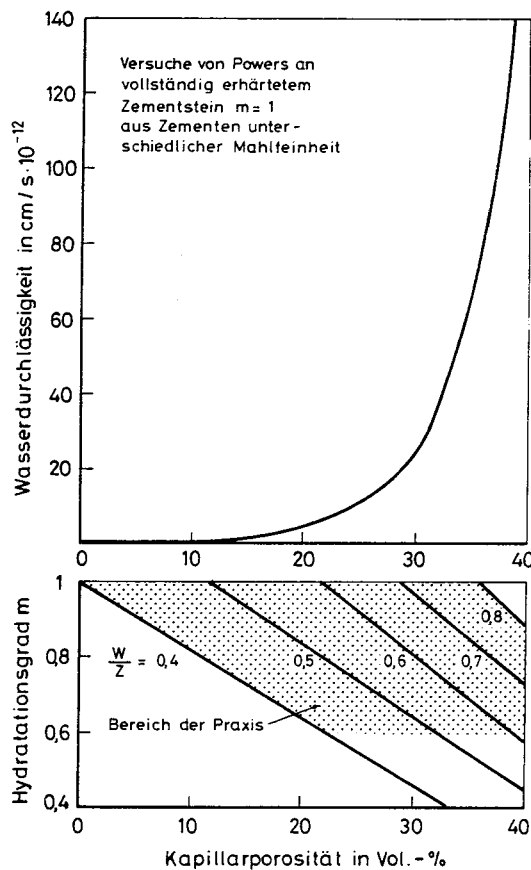


Bild 5.7.64 Wasserdurchlässigkeit von Zementstein abhängig von Kapillarporosität, W/Z-Wert und Hydratationsgrad

Man erkennt, daß die Durchlässigkeit ab  $p_k \approx 30\%$  steil ansteigt. Erst ab einem W/Z-Wert  $> 0,5$ , und bei mäßigem Hydratationsgrad bildet sich ein zusammenhängendes Porennetz. Ein Beton geringer Durchlässigkeit muß sowohl einen niedrigen W/Z-Wert als auch einen durch eine ausreichend lange feuchte Nachbehandlung gesicherten, hohen Hydratationsgrad aufweisen.

Feingemahlene Zemente führen zu einem dichteren Zementstein. Die Zementart übt keinen wesentlichen Einfluß aus. Die Durchlässigkeit natürlicher Zuschläge liegt im ähnlichen Größenbereich wie bei einem sehr dichten Zementstein [54].

#### Durchlässigkeit von Beton

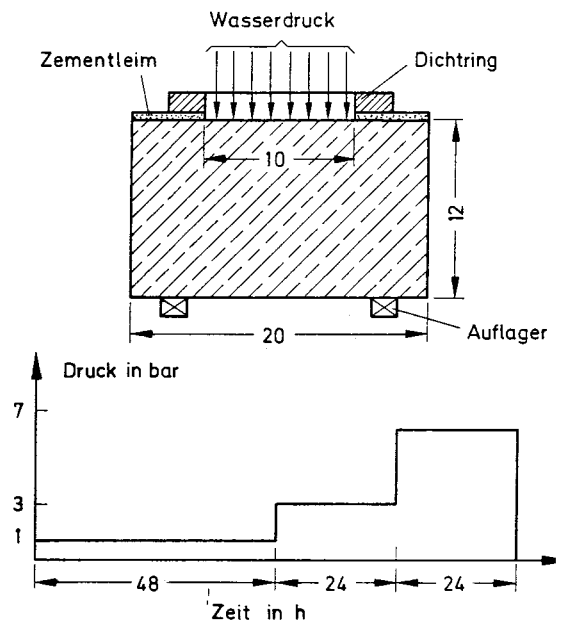
Die Durchlässigkeit von Beton ist größer als die des vollhydratisierten Zementsteins mit niedrigem W/Z-Wert. Neben den Kapillarporen enthält Beton eine Reihe von strukturellen Fehlstellen wie Mikrorisse, Verbundrisse u. a., die mit den Unterschieden im mechanischen und thermischen Verhalten von Zuschlag und Zementstein (Strukturunverträglichkeit) zusammenhängen. Hinzu treten fertigungsbedingte Fehlstellen wie Verdichtungsyporen, Sackungsrisse und Wasserlinsen unter Grobzuschlag und Bewehrung infolge Setzens und Blutens. Bild 5.7.65 zeigt, daß v. a. weiche Betone zu einem inhomogenen Gefüge neigen. An der Betonieroberseite tritt eine Anreicherung von Feinmörtel mit einem höheren effektiven W/Z-Wert auf. An geschalteten Seitenflächen ist ebenfalls eine Feinmörtelschicht vorhanden, die aber im Vergleich zur Oberseite viel dünner ist. Diese



Bild 5.7.65 Wirkliche Grobstruktur im Betonbauteil

Anreicherung von Feinsteilen (Zement + Feinstsand) und Wasser birgt die Gefahr der Mikrorißbildung infolge Schwindens in sich und ist für die Dauerhaftigkeit von Nachteil. Bauwerke, die längere Zeit drückendem Wasser ausgesetzt sind, müssen aus wasserundurchlässigem Beton sein, dessen Zusammensetzung in [N 1] geregelt ist. Darüber hinaus ist der Einsatz von wasserundurchlässigem Beton auch für der Witterung ausgesetzte Sichtbetonbauteile und bei besonderen Anforderungen (Betone mit besonderen Eigenschaften) notwendig. Der Begriff »wasserundurchlässiger Beton« ist mit zul. Grenzwerten der Durchlässigkeit verknüpft (s. Tab. 5.7.9).

Die Prüfung der Wasserundurchlässigkeit von Beton erfolgt nach DIN 1048. Betonplatten, siehe Bild 5.7.66, werden einem Wasserdruckprogramm ausgesetzt. Nach dem Versuch wird die Wassereindringtiefe gemessen (Spalten der Platten), sie darf bei einem wasserundurchlässigen Beton max. 5 cm betragen. Wie Bild 5.7.67 zeigt, nimmt die Eindringtiefe mit steigendem W/Z-Wert zu [62]. Mit zunehmender



Wasserundurchlässigkeitsprüfung von Beton nach DIN 1048

Bild 5.7.66 Wasserundurchlässigkeitsprüfung von Beton nach DIN 1048

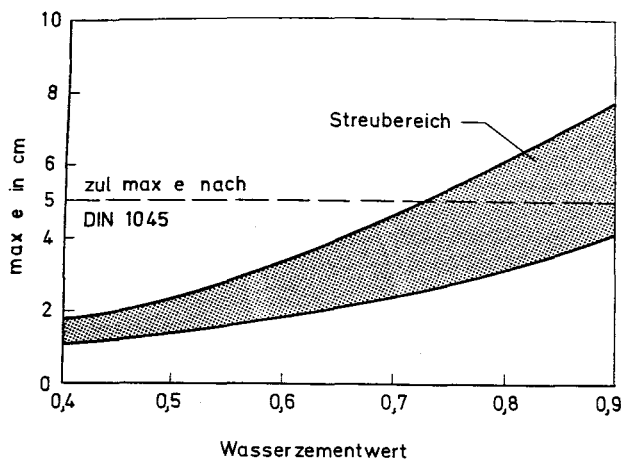


Bild 5.7.67 Größte Wassereindringtiefe abhängig vom Wasserzementwert. Prüfung nach DIN 1048, Prüflalter 28 d [5]

der Erhärtungsdauer bzw. zunehmendem Hydratationsgrad verringert sich die Eindringtiefe.

Im Ausland [1] hat man zur Messung des kapillaren Wasseraufnahmevermögens von Betonoberflächen Prüfverfahren entwickelt, bei denen kein Druck ausgeübt und das Eindringverhalten bei Regen simuliert wird. Bild 5.7.68 zeigt den schematischen Aufbau. Die Wasseraufnahme, s. Abschnitt 4.3.5.3, nimmt linear mit  $\sqrt{\text{Zeit}}$  und mit der Porosität des Betons zu. Bild 5.7.69 zeigt den Einfluß der Nachbehandlungsart auf die Durchlässigkeit in unterschiedlichem Abstand von der Oberfläche einer Mörtelplatte [63]. Die Notwendigkeit einer ausreichend langen feuchten Nachbehandlung im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit wird hierdurch unterstrichen.

Die Wasserdampf- und Gasdurchlässigkeit von Beton hängen von den gleichen Parametern ab wie die Wasserdurchlässigkeit.

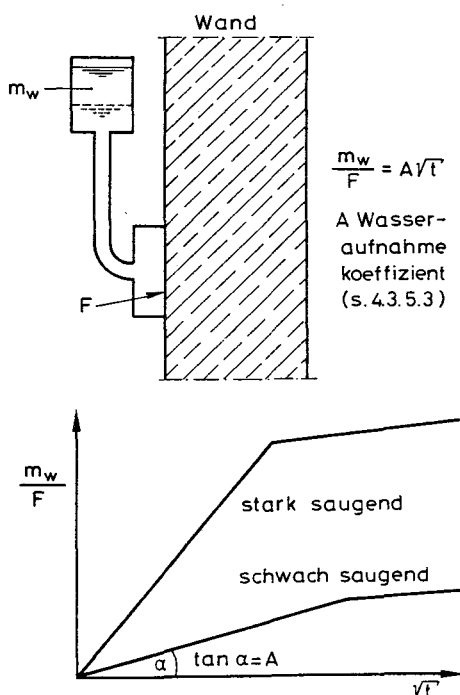


Bild 5.7.68 Wasseraufnahme durch kapillares Saugen

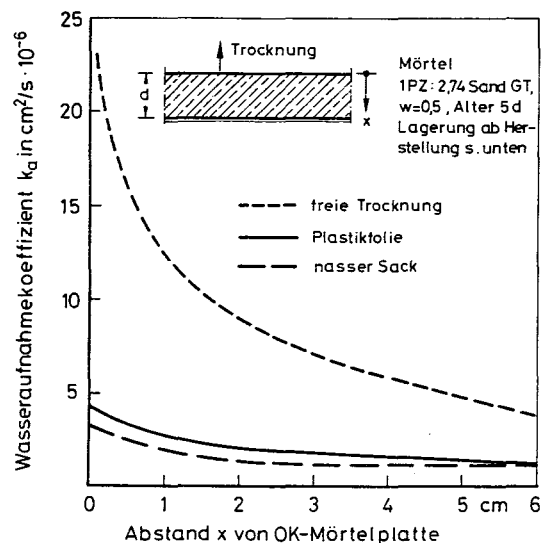


Bild 5.7.69 Einfluß der Nachbehandlung auf die kapillare Wasseraufnahme

#### 5.7.8.4 Rißbildung

##### Vorbemerkungen

Beton ist ein Baustoff mit vergleichsweise niedriger Zugfestigkeit. Da Betonbauteile während ihrer Nutzung neben der planmäßigen Beanspruchung auch komplexen, kaum erfassbaren Zusatzspannungen unterworfen sind, muß mit einer Rißbildung gerechnet werden. Risse in Betonbauteilen sind prinzipiell kein Bauschaden. Sie können jedoch die Dauerhaftigkeit gefährden, wenn ihre Breite, Tiefe und Dichte kritische Grenzwerte überschreitet. Erst dann ist das Eindringen von Feuchte und Gasen in Risse mit der Folge von Stahl- und Betonkorrosion sowie von Gefügelockerungen möglich. Solange diese Grenzwerte nicht überschritten werden, stellen Risse in Betonbauteilen nur einen ästhetischen Mangel dar, der nur subjektiv beurteilt werden kann. Im folgenden werden die Ursachen der Rißbildung und deren Rolle für die Dauerhaftigkeit erläutert. Nach der Ursache des Entstehens und nach der absoluten Größe kann man zwischen Mikro- und Makrorissen unterscheiden [57].

##### Mikrorißbildung

Die Entstehung von Mikrorissen im Betongefüge kann unter dem Stichwort »Unverträglichkeit« zusammengefaßt werden, die zwischen Zuschlag und Zementstein herrscht. Diese Unverträglichkeit entsteht sowohl durch Unterschiede zwischen den Elastizitätsmodulen als auch zwischen den Feuchte- und Wärmedehnungen von Zuschlag und Zementstein.

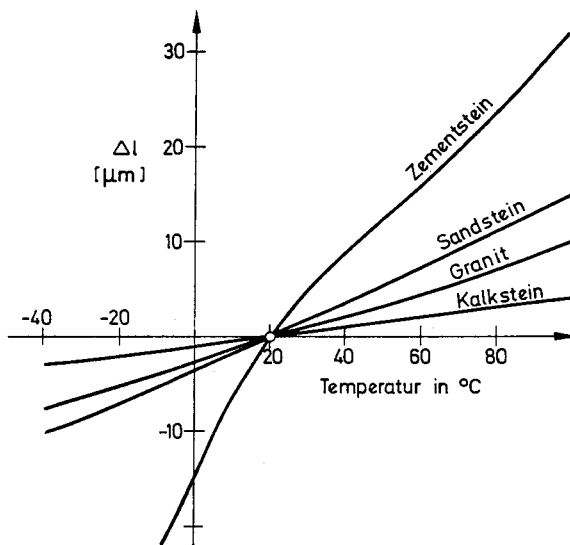
Mikrorisse entstehen infolge äußerer Spannungen und innerer Zwänge. Auf diese Unterschiede, die auf der Heterogenität von Beton beruhen bzw. diese hervorrufen, wurde bereits im Zusammenhang mit dem Bruchvorgang (siehe Bild 5.7.15) hingewiesen: Der höhere E-Modul des Zuschlags führt zur Spannkonzentration im Scheitel des Kornes und zu Haftzugspannungen in der Verbundzone. Die ersten Mikrorisse beginnen in der Verbundzone und pflanzen sich von da fort. Aber auch bereits im unbelasteten Zustand können Mikrorisse in der Mörtelmatrix und in der



Verbundzone entstehen. Der Zuschlag widersetzt sich dem Schwinden des Zementsteins. Diese Behinderung, ein innerer Zwang, erzeugt Gefügespannungen und als deren Folge Risse im Mörtel. Auch bei gleicher Temperatur im Zementstein und Zuschlagkorn entstehen Gefügespannungen. Bild 5.7.70 zeigt, daß nicht nur die Wärmedehnzahlen, sondern auch die E-Moduln der beiden Partner beträchtliche Unterschiede aufweisen können. Die Mikrorisse sind äußerst fein, ihr Verlauf ist unorientiert.

Es ist wichtig zu erkennen, daß Mikrorisse eine Werkstoffeigenschaft des Betons darstellen, die sich im mechanischen Verhalten niederschlägt. Ihr Einfluß auf die Dauerhaftigkeit besteht darin, daß vielmalige schroffe Temperaturwechsel (z.B. Frost-Tau-Wechsel) oder extreme Feuchtwechsel zu Gefügelockerungen führen können und damit das Eindringen aggressiver Stoffe erleichtern.

Die Entstehung von Mikrorissen kann nicht verhindert, aber in Grenzen gehalten werden. Hierzu ist die Unverträglichkeit abzubauen, was allerdings nur in Grenzen möglich und nötig ist. Mögliche Ansätze: Geringe Festigkeits- und E-Modulunterschiede; geringes Schwinden des Zementsteins u. a.



Stoff	Wärmedehnzahl $\alpha_t \cdot 10^6 \cdot ^\circ\text{C}$	E-Modul
	20 ÷ 100 °C	kN/mm <sup>2</sup>
Zementstein, PZ 35F w=0,5; Lag. 20/65	10,0	20 – 30
Sandstein	4,6	20 – 40
Granit	3,1	50 – 90
Kalkstein	1,3	50 – 80

Bild 5.7.70 Wärmedehnzahlen und E-Module verschiedener Betonkomponenten

#### Makrorißbildung

Makrorisse unterscheiden sich von Mikrorissen durch Ursache, Verlauf und Breite. Sie entstehen in Bauteilbereichen mit hohen Zugspannungen, z.B. in der Zugzone einer

Platte, sobald diese die Betonzugfestigkeit erreichen. Die Betonzugspannungen werden entweder durch Last, Zwang oder Eigenspannungen, häufig durch Überlagerung dieser Wirkungen erzeugt.

Im Vergleich zu den Mikrorissen durchdringen die Makrorisse größere Bereiche des Querschnitts. Ihre Breiten sind größer, ihr Verlauf ist orientiert, weil er durch Hauptzugspannungen vorgezeichnet ist.

Die Makrorisse infolge Beanspruchung durch Last und Zwang sind eine Konstruktionseigenschaft des Stahlbetons. Bei Bauwerken aus Stahlbeton wird der Ausfall des auf Zug beanspruchten Betons bewußt in Kauf genommen, und die Zugkräfte werden dem Betonstahl zugewiesen.

Makrorisse besitzen einen unmittelbaren Bezug zur Dauerhaftigkeit. Werden bestimmte Grenzwerte der Rißbreite, die von den Umgebungsbedingungen abhängen, überschritten, so ist das Eindringen stahlkorrosionsfördernder Stoffe in die Risse möglich. Während in trockenen Innenräumen die kritische Rißbreite 0,3 bis 0,4 mm betragen darf, soll sie in Außenbauteilen 0,1 bis 0,2 mm nicht überschreiten [60]. Durch entsprechende konstruktive Durchbildung von Bauteil und Bewehrung, durch Dehnfugen und durch zahlreiche andere betontechnische Maßnahmen versucht man, die Rißbildung zu kontrollieren. Bauwerke, deren Dichtigkeit unerlässlich ist, werden vorgespannt, um eine Rißbildung zu vermeiden.

#### 5.7.8.5 Betonangriff durch Frost und Auftausalze

##### Vorbemerkungen

Betonbauwerke, die der Witterung ausgesetzt sind, erfahren alljährlich häufige Frost-Tau-Wechsel. Anzahl und Temperaturspanne dieser Wechsel hängen vom regionalen Klima ab. Während im Hochgebirge nur rd. 30 Gefrierpunktsdurchschläge auftreten, werden im Mittelgebirge bis zu 100 pro Jahr beobachtet. Frost-Tau-Wechsel führen bei fehlerhafter Betontechnologie zu Frostschäden, die die Form von Abwitterungen, Abplatzungen u. a. m. aufweisen. Auftausalze verstärken die Frostbeanspruchung.

Junger Beton ist besonders frostgefährdet. Die Gründe hierfür und die Maßnahmen zur Erzielung der Gefrierbeständigkeit von jungem Beton sind bereits in Abschnitt 5.7.3 erläutert worden. Die Frostschädigung von erhärtetem Beton hängt von zahlreichen Parametern ab, die den Bereichen Klimabelastung, Betonstruktur und Betonfeuchte beim Gefrieren zugeordnet werden können.

Der Frostschaden nimmt zu, je tiefer die Temperatur und je größer die Frost-Tau-Wechselzahl ist. Hohe Abkühlgeschwindigkeit, verbunden mit einem steilen Temperaturgefälle im Oberflächenbereich des Bauteils, steigert den Schaden. Eine schwache Betonstruktur bietet einen geringeren Widerstand. Zur Schwächung führen: Hoher Wasserzementwert, unvollständige Verdichtung, mangelhafte Nachbehandlung und anderes mehr. Die Betonfeuchte spielt beim Gefriervorgang eine Schlüsselrolle: je größer der Gehalt an verdampfbarem und damit gefrierbarem Wasser ist, um so stärker ist die Frostschädigung.

Zur Erklärung des Frostschadens sind mehrere makro- und mikroskopische Modelle entwickelt worden [64 bis 66]. Der Frostschaden ist, abgesehen von der wahrnehmbaren Zerstörung z.B. einer Abplatzung, stets mit Lockerungen des

Oberflächengefüges verbunden. Hierdurch wird das Eindringen von gelösten Schadstoffen erleichtert und anderen Angriffen Vorschub geleistet.

#### Gefrieren von Wasser im hochporösen Zementstein

Das im Beton vorhandene, nicht gebundene Wasser ist sowohl verdampfbar als auch gefrierfähig. Die Beobachtung zeigt, daß die Gefriertemperatur des Porenwassers im Vergleich zu einer freien Wasseroberfläche deutlich unter  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  abgesenkt wird. Diese Gefrierpunktniedrigung besitzt mehrere Gründe:

- Das Porenwasser ist stets durch Alkalien, Salze u. a. verunreinigt.
- Durch Wechselwirkungskräfte zwischen Porenwand und adsorbierten Wassermolekülen wird deren Beweglichkeit vermindert. Damit geht eine Gefrierpunktniedrigung einher, die um so größer ist, je kleiner die Poren sind.

Der Gefrierpunkt von Wasser im porösen Zementstein erstreckt sich von  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis rd.  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . In diesem Bereich existieren Eis, adsorbiertes Wasser und Wasserdampf nebeneinander. Während das physikalisch ungebundene Wasser in Grobporen zwischen  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis rd.  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  gefriert, erfolgt der Phasenübergang in den Kapillar- und Gelporen mit abnehmendem Porenradius bei immer tieferen Temperaturen [64, 45] (Bild 5.7.71).

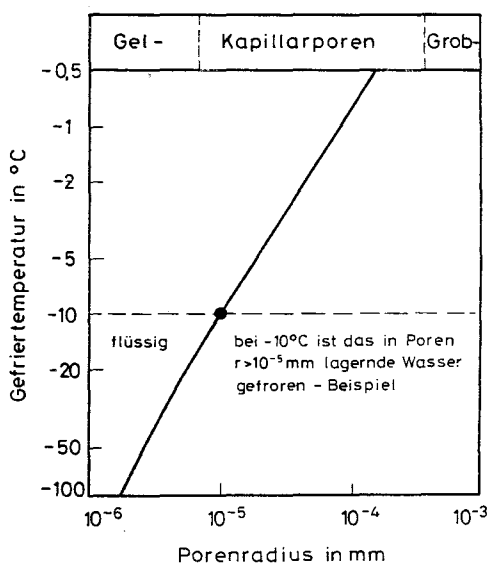


Bild 5.7.71 Gefriertemperatur von Wasser in Zementstein abhängig vom Porenradius

#### Mechanismen des Frostschadens

##### a) Mikroskopische Frostzerstörung

Nach [65] wird die Zerstörung Prozesse von zwei Effekten erzeugt: Hydrodynamischer Effekt (hydraulischer Druck) und kapillarer Effekt.

Die Eisbildung ist mit einer Volumenzunahme des Eises von rd. 9% gegenüber Wasser verbunden. Dabei wird vom Eis Wasser in feinere Poren verdrängt, wobei sich ein hydraulischer Druck aufbaut. Die Höhe des hydraulischen Drucks nimmt mit der Abkühlgeschwindigkeit, durch Unterkühlung und mit dem Wassergehalt im Zementstein zu.

Wie bereits erwähnt, existieren im Zementstein bei einer beliebigen Temperatur  $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  Eis (z. B. in Grob- und Kapillarporen) und Wasser (z. B. in Gelporen) gleichzeitig und nebeneinander. Dieser Zustand ist wegen des Dampfdruckunterschieds zwischen Eis und Wasser nicht im Gleichgewicht. Deshalb setzt eine Wasserwanderung von den feinen Poren zum Eis in den gröberen Poren ein (kapillarer Effekt). Damit wächst das Eisvolumen, und es entsteht ein Druck auf das Feststoffgerüst, der zu Mikrorissen und zu der in Bild 5.7.62 dargestellten Expansion führt.

Die Verwendung von Auftausalzen (meist Steinsalz  $\text{NaCl}$ ) verstärkt im allgemeinen den Frostangriff. Die Ursachen sind vielfältig [65]. Durch die Hygroskopizität von Tausalz erfolgt eine Zunahme der Betonfeuchte im Oberflächenbereich. Wird eine bereits vereiste Betonfahrbahn mit Streusalz eisfrei gemacht, so erfährt der Beton einen Kälteschock, weil ihm die erforderliche Schmelzwärme plötzlich entzogen wird. Mit diesem Kälteschock sind hohe Betonzugspannungen verbunden. Bei hoher Salzkonzentration der in die Betonporen eingedrungenen Tausalzlösung entstehen Salzkristalle und Kristallisationsdrücke.

Durch Auftausalze kann ein lagenweises Frieren der Betonoberflächenbereiche entstehen [67]. In Bild 5.7.72 wird gezeigt, wie der tiefenveränderlichen  $\text{NaCl}$ -Konzentration der Porenwasserlösung auch deren Gefrierlinie folgt. Es kann nun vorkommen, daß eine unter der Oberfläche liegende Zwischenschicht zunächst ungefroren bleibt und erst bei weiterem Absinken der Temperatur gefriert. Weil die Ausdehnung der Zwischenschicht behindert wird, kann es zum Absprengen der Oberschicht kommen.

Abschnitt 5.7.8.9 behandelt die stahlkorrosive Wirkung der Auftausalze. Neben Auftausalzen werden zur Enteisung auch noch Harnstoff- und Alkoholverbindungen angewandt.

##### b) Makroskopische Frostzerstörung

Makroskopische Frostzerstörungen werden durch Wärmespannungen bei steilen Temperaturgradienten und rascher Abkühlung, durch Gefügespannungen infolge thermischer

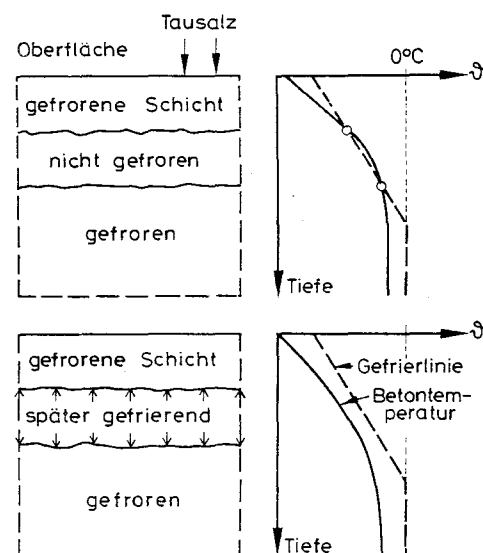


Bild 5.7.72 Schichtenweises Gefrieren infolge Tausalzeinwirkung auf Betonoberflächen

Unverträglichkeit von Zuschlag und Zementstein sowie durch andere Ursachen erzeugt. Sie äußern sich in Rissen, Abplatzungen und Gefügelockerungen. Mikro- und makroskopische Prozesse treten gleichzeitig auf [65].

#### Wirkung von Luftporenbildern

Erfahrungsgemäß kann Beton durch luftporenbildende Betonzusatzmittel beständig gegen wiederholte Frost-Tau-Wechsel und gegen die Wirkung von Auftausalzen gemacht werden. Durch Einführung von zusätzlichen künstlichen Luftporen mit Kugelgestalt wird der Eisbildung Wasserverdrängungsraum zur Verfügung gestellt, so daß sich kein hydraulischer Druck aufbauen kann.

Die Wirksamkeit des Schutzes hängt von der Menge an Luftporen, von deren Größe und Abstand ab. Die Frostbeständigkeit des Betons nimmt mit der Menge an Luftporen zu. Sie muß z. B. bei einem Größtkorn von 32 mm mehr als 3,5 Vol.-% betragen. Der Durchmesser der Luftporen muß unter 0,3 mm liegen, ihr Abstand zu einem beliebigen Punkt im Zementstein weniger als 0,2 mm betragen [67, 55, N 1].

#### Einige Parameter der Frostbeständigkeit

Die Frostbeständigkeit von Beton wird in erster Linie durch dessen Feuchtigkeitsgehalt beeinflusst. Sie nimmt mit zunehmendem Sättigungsgrad der Kapillarporen ab. Der Kapillarporenraum und damit die aufnehmbare oder vorhandene Masse gefrierfähigen Wassers steigt mit dem W/Z-Wert an. Trockener Beton erfährt keinen Frostschaden.

Luftporenbildner erhöhen die Frostbeständigkeit sowohl durch die zuvor beschriebenen Effekte als auch durch Reduktion des Wasserzementwerts bei gleicher Verarbeitbarkeit.

Die Frostzerstörung von Beton ist mit einer Lockerung und Zersprengung des Gefüges verbunden, die sich nach einem Frost-Tauwechsel als bleibende Expansion anzeigt, Bild 5.7.62. Diese bleibende Expansion nimmt bei einem nichtfrostbeständigen Beton mit jedem Zyklus zu, bis die Zersprengung eintritt, s. Bild 5.7.73. Die Wirkung von künstlichen Luftporen besteht in der Verminderung der Gefügaufweitung, wie Bild 5.7.74 zeigt. In diesem Bild sind neben dem Einfluß der Zuschlaggröße auf die bleibende Expansion auch die Anforderungen bezüglich LP-Gehalt nach DIN 1045 dargestellt. Frost- und tausalzbeständiger Beton erfordert dichte, frostbeständige Zuschläge.

#### 5.7.8.6 Chemischer Angriff, Betonkorrosion

##### Vorbemerkungen

Fachgerecht hergestellter Beton ist in der Regel gegenüber den Einflüssen der Atmosphäre, der Oberflächen- und Bodenwässer und des Baugrunds widerstandsfähig. Von bestimmten chemischen Stoffen jedoch kann Beton korrosiv angegriffen werden. Dabei ist, gemessen am meist korrosionsstabilen natürlichen Zuschlag, der Zementstein der leichter angreifbare Partner.

Die schädigenden Stoffe treten in wäßriger Lösung oder in Gasform ans Betonbauteil heran. In manchen Fällen sind sie bereits in den Ausgangsstoffen des Betons enthalten. Nach

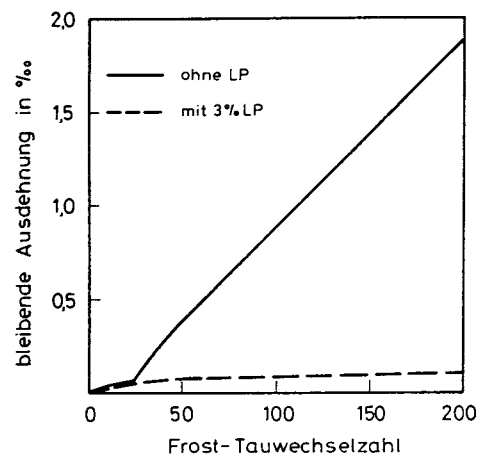


Bild 5.7.73 Bleibende Ausdehnung von Beton nach Frost-Tauwechseln abhängig vom LP-Gehalt

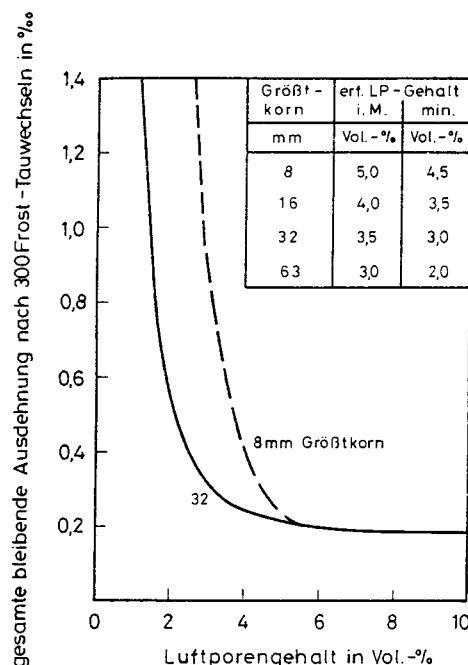


Bild 5.7.74 Abnahme der Ausdehnung infolge Frost-Tauwechsel abhängig vom LP-Gehalt und Größtkorndurchmesser

der Art der Schädigungsreaktion unterscheidet man zwischen

- lösendem Angriff und
  - treibendem Angriff,
- die im folgenden erläutert werden [58, 61].

#### Lösender Angriff

Beim lösenden Angriff finden auf der Betonoberfläche Reaktionen statt, bei denen schwerlösliche Verbindungen des Zementsteins in leichtlösliche überführt werden. Der Zementstein, insbesondere das wenig stabile Calciumhydroxid, wird bevorzugt herausgelöst, und es entsteht eine aufgeraute Oberfläche.

Bild 5.7.75 gibt einen Überblick über die lösenden Angriffsstoffe. Die Mineralsäuren (Schwefel-, Salz- und Salpetersäure) sind im allgemeinen stärker angreifend als organi-

sche Säuren (Huminsäure, Milchsäure, Essigsäure). Der Betonangriff durch Schwefelwasserstoff ist in Abwasserleitungen möglich. Der Schwefelwasserstoff wird dabei durch Mikroorganismen zu Schwefelsäure oxidiert.

Die Magnesium- und Ammoniumsulfate (Sulfate und Chloride) lösen das Calciumhydroxid, Ammoniumsulfat wirkt außerdem treibend. Ammoniak greift Beton nicht an.

Weiche, natürliche Wässer (< 3 °d) können die Oberfläche von dichtem Beton nur unwesentlich anlösen. Die kalklösende Kohlensäure entsteht durch Lösung von Kohlendioxid im Wasser; sie tritt in weichen Wässern in Gebieten mit Vulkangesteinen, in Moorwässern und an CO<sub>2</sub>-haltigen Quellen, sog. Kohlensäuerlingen, auf und löst das Calciumhydroxid.

Pflanzliche und tierische Fette und Öle weisen einen gewissen Anteil an freien Fettsäuren auf, die mit dem Calciumhydroxid reagieren (Verseifen) und zu einer Gefügelockerung führen. Mineralfette und -öle, die säurefrei sind, greifen Beton nicht an.



Angreifende Stoffe		Angriffsgrad nach
Säuren	Mineralsäuren organ. Säuren Schwefelwasserstoff kalklösende Kohlensäure	pH-Wert der Wässer Säuregrad des Bodens
austauschfähige Salze	Magnesium- und Ammoniumsulfate und -chloride	Mg <sup>2+</sup> - Gehalt NH <sub>4</sub> <sup>2+</sup> - Gehalt
weiches Wasser	—	Gesamthärte
organische Fette+Öle	—	—

Bild 5.7.75 Vorgang und Stoffe lösenden Angriffs

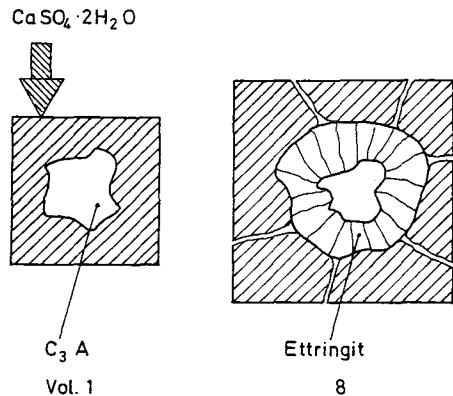


### Treibender Angriff

Hierunter versteht man Reaktionen, die zu Produkten unter Volumenzunahme führen. Erfolgt die Volumenzunahme vor dem Ansteifen des Betons, so ist sie ungefährlich. Erfolgt sie jedoch verzögert im bereits erhärteten Beton, so erzeugt der Kristallisationsdruck innere Spannungen, die zum Sprengen führen können.

Die beiden, unmittelbar vom Zement ausgehenden Ursachen Kalk- und Magnesiatreiben sind durch Begrenzung von freiem CaO und MgO bei der Zementproduktion bedeutungslos geworden. Baupraktisch wichtig ist das Sulfatreiben.

Sulfate verschiedener Herkunft – siehe Bild 5.7.76 – können in gelöster Form in den Beton eindringen oder mit dem Zuschlag eingebracht worden sein. Sie reagieren mit den Hydraten des Tricalciumaluminats zu einem wasserreichen Produkt, das man Ettringit nennt. Der Ettringit 3 CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 3 CaSO<sub>4</sub> · 32 H<sub>2</sub>O kristallisiert mit einer beträchtlichen Volumenzunahme und führt bei Vorhandensein kritischer Sulfatgehalte u.a. zu Treibrissen.

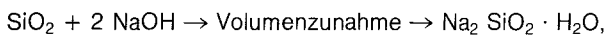


Angreifende Stoffe		Angriffsgrad nach
Sulfat	Grundwasser Abwasser Moorwasser Gipsboden Gips im Zuschlag	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> - Gehalt

Bild 5.7.76 Vorgang und Stoffe des Sulfattreibens

Eine besondere Art des treibenden Angriffs ist das Alkalitreiben, das in Norddeutschland und Dänemark zu beträchtlichen Schäden geführt hat. Die treibende Reaktion entsteht durch das Zusammenwirken von Zement, Feuchte und reaktionsfähigem, silikatischem Zuschlag [68, 69]. Einige Zuschlagsarten, wie Opal-, sandstein, Flint, Chalzedon u.a. bestehen teilweise aus amorpher oder schlecht kristallisierter Kieselsäure SiO<sub>2</sub>. Sie reagieren in Gegenwart von Feuchte (Porenwasser sowie von außen zugeführte Feuchte) mit den Hydroxiden des Kaliums und Natriums aus dem Zement. Über Meerwasser und Tausalzlösungen ist auch eine Alkalizufuhr von außen in begrenztem Maße möglich.

Der kristallisierte Quarz reagiert nur gering mit Alkalien. Demgegenüber können die Alkaliionen in das gestörte Gitter reaktiver amorpher Zuschläge eindiffundieren. Dabei entstehen Alkalisilikathydrate,



die eine gelartige Struktur besitzen und wegen ihres Aufquellens treibend wirken. Die Alkalireaktion zeigt sich durch weiße Ausblühungen, Geltropfen und letztlich durch Netzrisse an, die das Betongefüge tief auflockern können.

Das Alkalitreiben wird von folgenden Faktoren beeinflusst:

a) Zuschlag

Besonders reaktionsfähig sind Opal, Opalsandstein und Flint. Die Treibwirkung nimmt mit dem Anteil reaktionsfähigen Zuschlags zu und ist um so stärker, je feiner dieser ist (zunehmende spezifische Oberfläche für Reaktionen).

b) Zement

Der Alkaligehalt der Porenlösung im Beton hängt sowohl vom Anteil der Alkalien des Zements als auch von der Zementmenge ab. Die Treibwirkung nimmt mit Zunahme des Gesamtalkaligehalts zu, den man mit dem sog.  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent kennzeichnet. Bild 5.7.77 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Zementgehalt, dem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent des Zements und der Alkalitreibgefahr bei opalhaltigem Zuschlag. Da Flint nur rd.  $\frac{1}{5}$  der Reaktionsfähigkeit von Opal aufweist, wird die Grenzlinie mit zunehmendem Flintanteil im Zuschlag nach rechts verschoben. Bei Alkalizufuhr von außen ist das Gegenteil der Fall.

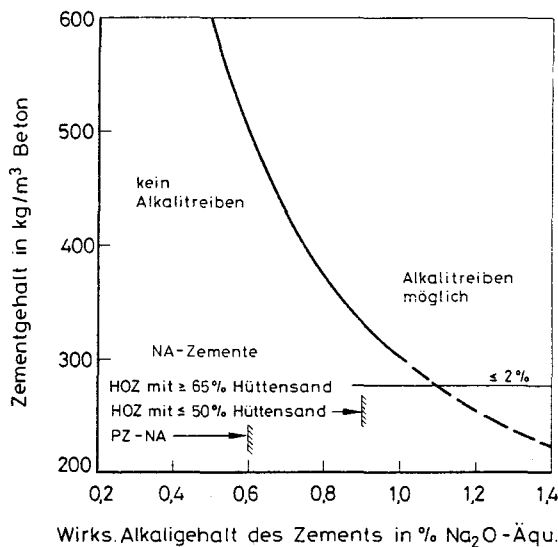


Bild 5.7.77 Zusammenhang zwischen Alkali- und Zementgehalt beim Alkalitreiben von Beton

c) Umgebungsbedingungen

Von den Umgebungsbedingungen übt die Feuchtigkeit den größten Einfluß aus. Bauteile im Inneren von Gebäuden, die keine Feuchtezufuhr erfahren, sind weniger gefährdet als solche, die häufig und dauernd befeuchtet werden (Wasser-

bauten). Die ungünstigste Bedingung liegt bei starker Feuchte- und gleichzeitiger Alkalizufuhr (Meerwasser, Tau-salzlösung) vor. Auch an massigen Bauteilen im Inneren von Gebäuden wurde Alkalitreiben beobachtet, da der überschüssige Anteil des Betonanmachwassers eine ausreichend hohe Betonfeuchte zur Verfügung stellte.

Beurteilung des chemischen Angriffs

Bei Auswahl der Betonkomponenten oder einer passiven Schutzmethode muß die Intensität des chemischen Angriffs in Betracht gezogen werden. Die Beurteilung des Angriffsvermögens von Wässern, Böden und Gasen erfolgt nach DIN 4030 [N 8] auf Basis der Ergebnisse chemischer Untersuchungen. DIN 4030 enthält Richtwerte der Konzentration und anderer Eigenschaften, die bestimmten Angriffsgraden zugeordnet sind.

Angriffsgrad von Wässern

Tabelle 5.7.13 zeigt die angreifenden Bestandteile von Wässern. Die Grenzwerte gelten für stehendes bis schwach fließendes Wasser, das in großer Menge gegen das Betonbauteil ansteht. Durch Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit nimmt der Angriff zu (Abtrag der Korrosionsprodukte). Den Angriffsgraden »schwach« und »stark« betonangreifend kann mit betontechnischen Mitteln begegnet werden; beim »sehr starken« Angriff ist ein zusätzlicher, passiver Schutz der Betonoberflächen unumgänglich [N 1]. Da weiche Wässer einen dichten Beton praktisch nicht schädigen und auch Chloride betonunschädlich sind (jedoch den Stahl im Beton angreifen), sind hierfür Grenzwerte nicht erforderlich.

Das Meerwasser wäre von seiner Zusammensetzung her als »sehr stark« betonangreifend einzustufen: Nordsee mit  $2780 \text{ mg SO}_4^{2-}/\text{l}$ ,  $1330 \text{ mg Mg}^{2+}/\text{l}$  u. a. Die Erfahrung lehrt jedoch, daß Bauwerke aus dichtem Beton im Meerwasser beständig sind. Es wird vermutet, daß sich in den oberflächennahen Poren Ablagerungen von Calciumcarbonat (Reaktion von  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  im Zementstein mit den Hydrogencarbonaten des Meerwassers) bilden, die das Eindringen von Sulfat und Magnesium verhindern [70]. Aus diesem Grund wird Meerwasser nur als »stark« betonangreifend eingestuft.

Angriffsgrad von Böden

Die Beurteilung erfolgt, siehe Tabelle 5.7.14, nach dem Säuregrad und dem Sulfatgehalt. Ein Betonangriff kann aber

Tab. 5.7.13 Grenzwerte zur Beurteilung des Angriffsgrades von Wässern vorwiegend natürlicher Zusammensetzung [N 8]

Untersuchung	Angriffsgrade		
	schwach angreifend	stark angreifend	sehr stark angreifend
pH-Wert	6,5 bis 5,5	5,5 bis 4,5	unter 4,5
kalklösende Kohlensäure ( $\text{CO}_2$ ) in $\text{mg/l}$ best. mit dem Marmorversuch nach Heyer	15 bis 30	30 bis 60	über 60
Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) in $\text{mg/l}$	15 bis 30	30 bis 60	über 60
Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) in $\text{mg/l}$	100 bis 300	300 bis 1500	über 1500
Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) in $\text{mg/l}$	200 bis 600	600 bis 3000	über 3000

nur entstehen, wenn der Boden genügend Feuchtigkeit enthält und wenn seine Dichtigkeit gering ist (Sickerströmung).

#### Angriffsgrad von Gasen

Abgase verschiedenster Herkunft können Säuren etc. enthalten und auf der Bauteiloberfläche oder im Porenraum kondensieren. Die Beurteilung ist nur im jeweiligen Fall möglich.

#### Alkalitreibneigung des Zuschlags

In [N 9] werden notwendige betontechnische Maßnahmen dargelegt, mit denen dem Alkalitreiben vorgebeugt werden kann. Durch petrographische Untersuchung wird eine Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit der einzelnen Kornfraktionen eines natürlichen Zuschlags vorgenommen, siehe Tab. 5.7.15. Dabei darf innerhalb einer Empfindlichkeitsstufe keiner der drei Grenzwerte überschritten werden.

Tab. 5.7.14 Grenzwerte zur Beurteilung des Angriffsgrades von Böden [N 8]

Untersuchung	Angriffsgrade	
	schwach angreifend	stark angreifend
Säuregrad nach Baumann-Gully	über 20	–
Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) in mg je kg lufttrockenen Bodens	2000 bis 5000	über 5000

Tab. 5.7.15 Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Betonzuschlag anhand seines Gehalts an Opalsandstein, anderen opalhaltigen Gesteinen und an reaktionsfähigem Flint [N 9]

Bestandteile	Grenzwerte in Gew.-% für die Empfindlichkeitsstufen		
	unbedenklich	bedingt brauchbar	bedenklich
Opalsandstein + andere opalhaltige Gesteine* über 1 mm	< 0,5	0,5 bis 2,0	> 2,0
reaktionsfähiger Flint über 4 mm	< 3,0	3,0 bis 10,0	> 10,0
5 × (Opalsandstein + andere opalhaltige Gesteine) + reaktionsfähiger Flint	< 4,0	4,0 bis 15,0	> 15,0

\* einschließlich reaktionsfähiger Flint 1 bis 4 mm

In Abhängigkeit von den gegebenen Umgebungsbedingungen, siehe Tabelle 5.7.16, und von der Alkaliempfindlichkeit des Zuschlags ist es dann möglich, über die Verwendbarkeit des Zuschlags zu entscheiden. Wie Tabelle 5.7.16 zeigt, kann man, auch bei Vorliegen der Empfindlichkeitsstufen »bedingt brauchbar« und »bedenklich«, den Zuschlag verwenden, wenn ein NA-Zement nach DIN 1164 (mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt) gewählt wird.

Da Alkalitreiben nur dann auftritt, wenn eine ausreichende Feuchtigkeitsmenge zur Verfügung steht, kann das Fortschreiten des Alkalitreibens an befallenen Bauteilen nur durch das Fernhalten von Feuchte gebremst werden. Durch geeignete hinterlüftete Verkleidungen, durch wasserdichte aber wasserdampfdurchlässige Anstriche u. a. sind praktische Erfolge erzielt worden.

#### 5.7.8.7 Erosion

Die Erosion ist ein physikalisch-mechanischer Angriff auf Betonoberflächen, der zu Abtrag und Gefügelockerungen führt. Die Grundvorgänge des Verschleißes sind in Abschnitt 4.5 bereits geschildert worden. In DIN 1045 werden Anleitungen zur Herstellung von Beton mit hohem Abnutz widerstand gegeben.

Tab. 5.7.16 Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton [N 9]

Alkaliempfindlichkeit des Zuschlags	Umweltbedingungen		
	trocken	feucht	feucht + Alkalizufuhr von außen
unbedenklich	keine	keine	keine
bedingt brauchbar	keine	NA-Zement <sup>1</sup>	NA-Zement
bedenklich	keine	NA-Zement	Austausch des Zuschlags <sup>2</sup>

1 nur bei Beton der Festigkeitsklassen B 35 und höher

2 nur bei Beton der Festigkeitsklassen B 35 und höher, andernfalls NA-Zement

#### 5.7.8.8 Verwitterung

Die bisherigen Erläuterungen haben sich mit bestimmten Einzelangriffen hoher Intensität befaßt. Im Vergleich dazu ist der atmosphärische Angriff (s. Abschnitt 5.3.3), der die Verwitterung von Betonoberflächen erzeugt, wenig beachtet

worden. Der atmosphärische Angriff ist ein zusammengesetzter: Wechsel von Befeuchtung und Trocknung, Wechsel von Temperatur in verschiedenen Temperaturbereichen einschließlich Gefrieren und Tauen von Wasser, schwacher bis starker, meist saurer Angriff durch Niederschlag und Luftverschmutzung.

Alle diese Wirkungen treten gemeinsam und sehr häufig auf. Sie können zu Verfärbungen, Mikrorissen, Gefügelockerungen u. a. und zu einer allmählichen Verwitterung führen, die nicht leichtfertig als ein Altern abgetan werden darf. Langfristig gesehen hängt die Architekturqualität eines Bauwerks eng mit der Verwitterung zusammen. Bei Beachtung der in Abschnitt 5.7.8.10 beschriebenen Schutzmaßnahmen ist es möglich, die Verwitterung zu hemmen.

#### 5.7.8.9 Korrosion von Stahl in Beton und Einpreßmörtel

##### Passivierung von Stahl im Betonmilieu

Der im Beton eingebettete Bewehrungs- und Spannstahl (Vorspannung mit sofortigem Verbund) ist ebenso wie der vom Hüllrohr und dichtem Zementeinpreßmörtel umgebene Spannstahl bei der Vorspannung mit nachträglichem Verbund im allgemeinen dauerhaft korrosionsgeschützt. Voraussetzung hierfür sind eine ausreichend dicke und dichte Betonüberdeckung und bei Spanngliedern außerdem die möglichst vollständige Hüllrohrverfüllung mit Einpreßmörtel (s. Bild 5.7.78).

Die Schutzwirkung kommt durch die Basizität des Wassers in den Zementsteinporen (Porenwasser) zustande, das eine alkalische Lösung des Calciumhydroxids im Zementstein mit  $\text{pH} \approx 12-13$  darstellt. Wie Bild 5.3.9 zeigte, findet – sofern der Elektrolyt keine Chloridionen und Salze enthält – im Bereich  $\text{pH} \approx 9-13$  keine abtragende Korrosion statt, da der Stahl passiviert ist.

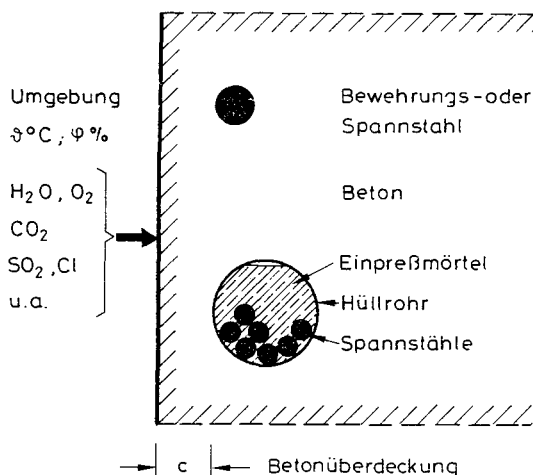


Bild 5.7.78 Stahl in Beton und Einpreßmörtel sowie äußerer Angriff

Die Praxis lehrt, daß trotzdem Stahlkorrosion unter bestimmten Umständen auftreten kann, und zwar bei:

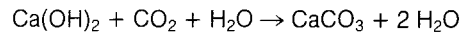
- Mangelhafter Umhüllung des Stahls infolge zu geringer Dichtigkeit und Dicke der Betonüberdeckung und des Einpreßmörtels sowie durch Fehler in der Zusammen-

setzung des Betons usw. (Planungs- und Ausführungsmängel).

- Carbonatisierung des Betons oder Einpreßmörtels,
- Eindringen von korrosionsfördernden Stoffen wie  $\text{SO}_4^{2-}$ - und  $\text{Cl}^-$ -Ionen aus der Umgebung,
- Korrosionsempfindlichkeit des Stahls, meist im Zusammenhang mit hohen Stahlzugspannungen.

##### Carbonatisierung

Das in Luft und Feuchtigkeit enthaltene Kohlendioxid diffundiert in den Betonporen um, wo es in Gegenwart von Wasser mit dem Calciumhydroxid reagiert und dieses zum nicht-schützenden Calciumkarbonat wandelt:



Wie Bild 5.7.79 zeigt, sinkt dabei der pH-Wert innerhalb der Betondeckung unter 9 ab. Dabei wird als Carbonatisierungstiefe  $x$  jener Abstand von der Betonoberfläche verstanden, innerhalb dessen der pH-Wert unter 9 abgesunken ist. Der Grenzwert nach längerer Zeit ist  $x_\infty$ .

Liegt der Stahl ganz oder teilweise im vollständig carbonatisierten Bereich, so wird er depassiviert, und es setzt bei Anwesenheit von Feuchtigkeit eine abtragende Korrosion ein. Der Rost besteht aus wasserreichen Eisenoxiden, die wegen Volumenzunahme treibend wirken und die Betondeckung absprennen können.

Die Carbonatisierung ist ein Diffusionsprozeß, der abhängig von mehreren Einflüssen abläuft. Folgende Einflüsse sind – neben dem Kohlendioxidgehalt der Luft – maßgebend (normaler  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Luft 0,03 Vol.-%; es wurden bis zu zehnmal so große Werte in Stadt- und Industriatmosphäre gemessen):

- Umgebungsbedingungen

Die Carbonatisierung ist bei rel. Feuchten zwischen 50 und 70% am größten. Bei sehr niedriger Luftfeuchte und Lage

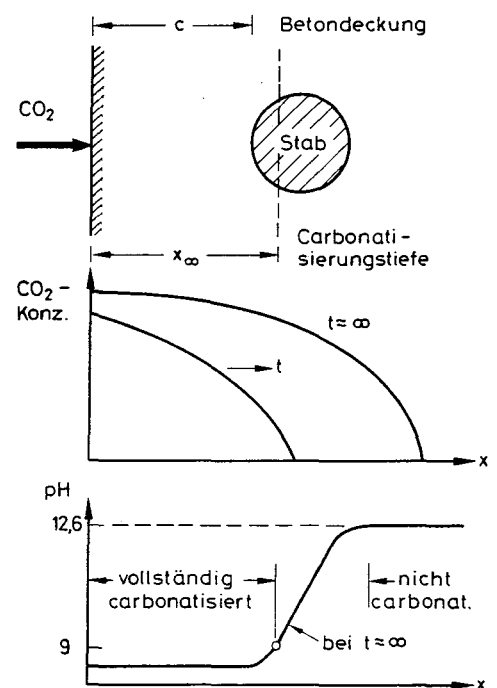


Bild 5.7.79 Vorgang der Carbonatisierung von Beton

des Bauteils unter Wasser ist sie vernachlässigbar. Dementsprechend zeigen unmittelbar berechnete Bauteile eine kleinere Carbonatisierungstiefe als geschützt lagernde. Im Inneren von Gebäuden treten die größten Werte auf.

#### b) Dichtigkeit des Betons

Die Carbonatisierungstiefe ist um so geringer, je dichter der Beton ist. Die Dichtigkeit steigt an mit abnehmendem W/Z-Wert, bei zunehmendem Zementgehalt, bei sorgfältiger Nachbehandlung und bei intensiver Verdichtung.

#### c) Carbonatisierungsfortschritt

Die Eindringgeschwindigkeit der Carbonatisierungsfront folgt einem  $\sqrt{\text{Zeit}}$ -Gesetz. Nach [61] beträgt die mittlere Endtiefe  $x_{\infty}$  nach rd. 30 Jahren für die Festigkeitsklassen des Betons nach DIN 1045:

Betonfestigkeitsklasse	ungefähre mittlere Tiefe $x_{\infty}$ in mm nach 30 Jahren
B 15	< 30
B 25	< 17
B 35	< 10
B 45	< 3
B 55	< 3

Die Carbonatisierung dringt im ungerissenen Betonbereich nicht als ebene Front ein. Inhomogenitäten u. a. fördern die Entstehung von Carbonatisierungsspitzen, deren Tiefe das 1,5- bis 2fache der mittleren Tiefe beträgt [72].

An Rissen, siehe Bild 5.7.80, dringt die Carbonatisierung entlang der Rißflanken ein, wobei der Fortschritt wegen der höheren Feuchte im Inneren des Betons im Vergleich zu dessen Oberfläche rascher erfolgt. Für die Korrosion des Stahles im Rißgrund ist nicht die Rißbreite an der Oberfläche, sondern die Rißbreite unmittelbar am Stahl maßgebend. Man hat festgestellt, daß eine genügend dicke und dichte Betondeckung eine größere Wirkung für den Schutz des Stahls besitzt als die Beschränkung der Breite der Risse auf der Bauteiloberfläche. Darüber hinaus ist der Korrosionsabtrag in schmalen Rissen geringer, weil die Zufuhr von passivierender Alkalität aus Nachbarbereichen den

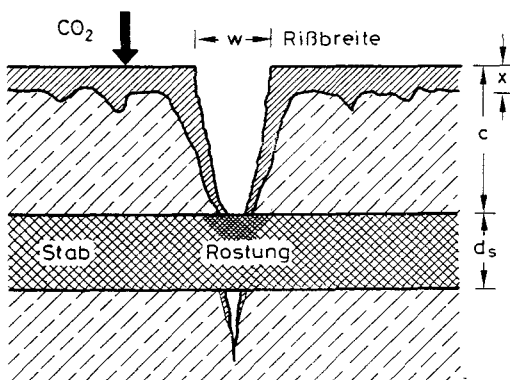


Bild 5.7.80 Carbonatisierung der Rißflanken

Stahl schützt und weil eine Verstopfung des Risses durch Ablagerungen eintritt.

#### Wirkung korrosionsfördernder Stoffe, Chloridangriff

Mit zunehmender Luftverschmutzung durch Schwefeldioxid können durch Reaktionen mit dem Zementstein Lockerungen im Gefüge der oberflächennahen Bereiche entstehen, die die Durchlässigkeit des Betons für Feuchte,  $\text{CO}_2$ , Sauerstoff usw. erhöhen.

Chloride haben sich als besonders stahlaggressiv herausgestellt (s. Abschnitt 5.3, Chloridkorrosion), weil sie auch im noch nicht carbonatisierten Betonbereich die Passivschicht des Stahls punktuell durchbrechen und, insbesondere an Rissen, Lochfraß erzeugen. Im carbonatisierten, ungerissenen Beton erzeugen Chloride verstärkten Flächenabtrag.

Die Chloride in Beton können unterschiedlicher Herkunft sein. Sie gelangen entweder mit den Ausgangsstoffen in den Beton oder werden extern zugeführt: Streusalze; Industrie- und Meeresatmosphäre; Trink-, Meerwasser; PVC-Brand.

Ein Teil der Chloride wird im Beton gebunden und damit korrosionschemisch unwirksam. Diese Bindung erfolgt sowohl adsorptiv im Zementgel als auch chemisch als sog. Friedelsches Salz  $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$  und in anderen Phasen. Diese Verbindungen sind nur im alkalischen Betonmilieu stabil und werden durch Luftkohlenensäure und andere Säuren zersetzt.

Die chemische Bindung von Chloridionen im schwerlöslichen Friedelschen Salz hängt von mehreren Faktoren ab, deren Wirkung noch nicht endgültig geklärt ist. Sie nimmt mit Zunahme des Tricalciumaluminats des Zements zu, hingegen mit Zunahme des Sulfatgehalts ab (s. Bild 5.7.81).  $\text{C}_3\text{A}$ - und  $\text{SO}_3$ -Gehalt hängen jedoch voneinander ab. Die Bindung steigt mit Zunahme des pH-Werts an; dies ist an dem Schwellenwert des  $\text{Cl}^-$ -Gehalts in Abhängigkeit vom pH-Wert aus Bild 5.7.82 ablesbar. Er beträgt rd. 0,4 M.-%  $\text{Cl}^-$ -Ionen, bezogen auf das Zementgewicht, bei einem pH-Wert von rd. 13. Erst der darüber liegende Gehalt an freien  $\text{Cl}^-$ -Ionen ist stahlangreifend. Mit Abnahme des pH-Werts sinkt auch der Schwellenwert. Im carbonatisierten Beton führen auch niedrigere Chloridgehalte zu Korrosion.

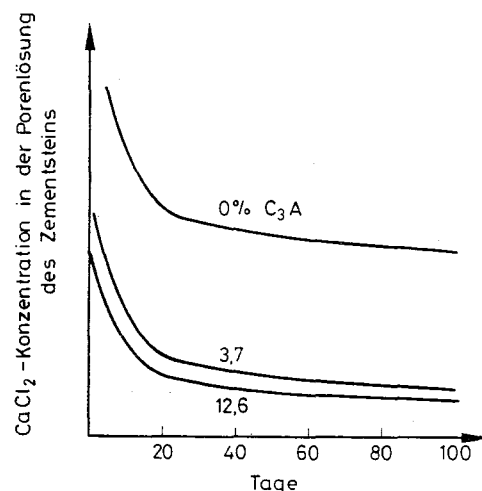


Bild 5.7.81 Einfluß des  $\text{C}_3\text{A}$ -Gehalts des Zements auf die chemische Bindung von Calciumchlorid [71]



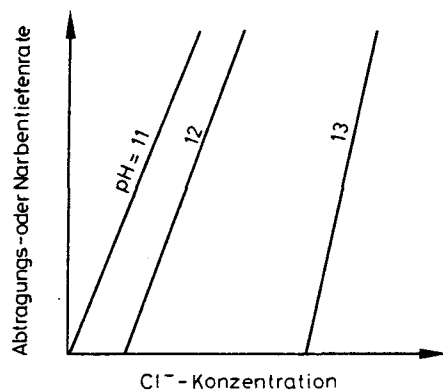


Bild 5.7.82 Korrosionsrate abhängig von der  $\text{Cl}^-$ -Konzentration und von pH-Wert [71]

Die physikalisch-adsorptive Bindung der  $\text{Cl}^-$ -Ionen hängt von der Struktur des Zementsteins ab, die von der Zementart, der Mahlfineinheit des Zements, dem Wasserzementwert und von den Erhärtungsbedingungen beeinflusst wird. Betone mit Hochofenzement HOZ-NW/HS setzen dem Eindringen von Chlorid-Ionen einen größeren Widerstand als Betone mit PZ 25 oder gar PZ 25-HS (niedriger  $\text{C}_3\text{A}$ -Gehalt) entgegen, siehe Bild 5.7.83. Der Widerstand gegen  $\text{Cl}^-$ -Diffusion nimmt mit zunehmender Dichtigkeit des Betons zu ( $\text{W/Z-Wert} < 0,50$ , Zementgehalt  $> 330 \text{ kg/m}^3$  usw.) [70]. Die Geschwindigkeit des Eindringens der  $\text{Cl}^-$ -Ionen hängt von der  $\text{Cl}^-$ -Konzentration des gegen die Betonoberfläche anstehenden Mediums ab (z.B. feuchte Luft, wässrige Lösung wie Meerwasser mit  $20 \text{ g Cl}^-/\text{l}$ ) und folgt einem  $\sqrt{\text{Zeit}}$ -Gesetz. Bild 5.7.83 zeigt, wie die Front mit dem kritischen Chloridgehalt von  $0,4 \text{ M.-% Cl}^-$  (pro Zementgewicht) in Betone mit unterschiedlichen Zementarten eindringt. Bei heißem Meerwasser ist demnach eine Betondeckung von  $50 \text{ mm}$  erforderlich, sofern ein Zement HOZ-NW/HS gewählt wird. Bezüglich anderer Umgebungsbedingungen siehe [55].

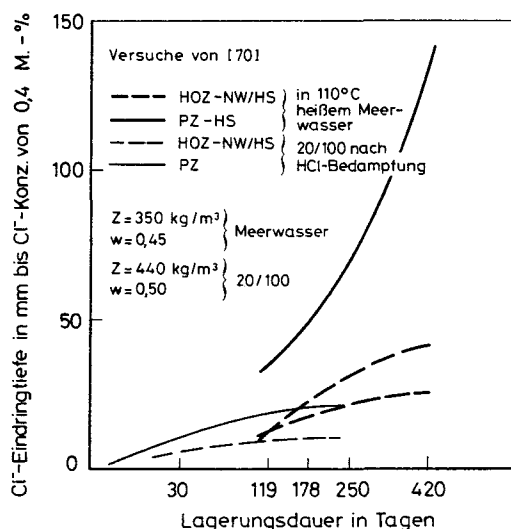


Bild 5.7.83 Eindringen von freiem Chlorid in Beton in heißem Meerwasser und an feuchter Luft

Die Konzentration an  $\text{Cl}^-$ -Ionen ist bei Zufuhr von außen an der beaufschlagten Oberfläche am höchsten und nimmt dann steil ins Innere ab. Bild 5.7.84 zeigt für eine Fahrbahnplatte aus Spannbeton die örtliche Verteilung der  $\text{Cl}^-$ -Konzentration nach mehrjährigem Einwirken von Tausalzlösung, die die Abdichtung unterlaufen hatte. Die Bewehrung und Spannglieder lagen in einem Bereich mit hoher  $\text{Cl}^-$ -Konzentration und wiesen beträchtliche Lochfraßnarben auf. Ab einem Abstand von rd.  $10 \text{ cm}$  von Oberkante Platte schwenkt die Verteilung auf den sog. natürlichen  $\text{Cl}^-$ -Gehalt des Betons ein, der von den Ausgangsstoffen Zuschlag, Zugabewasser und Zement herrührt und der zwischen  $0,1$  bis  $0,2\%$  des Zementgewichts schwankt.

Bild 5.7.85 zeigt ein weiteres Beispiel starker Chlorideinwirkung infolge von Tausalz. Durch den Tausalznebel wird der kritische Chloridgehalt in Wänden entlang von Straßen noch in großer Entfernung von der Fahrbahn überschritten, und es wird Korrosion hervorgerufen [73].

Die Abwehr von Chloridkorrosion setzt bei den Betonkomponenten ein. Für Spannbeton begrenzt man nach [N 7] die Chloridgehalte der Komponenten wie folgt:

- $0,02 \text{ M.-%/kg}$  Zuschlag
- $0,06 \text{ M.-%/l}$  Zugabewasser
- $0,10 \text{ M.-%/kg}$  Zement

Der resultierende  $\text{Cl}^-$ -Gehalt liegt mit diesen Werten für praxisnah zusammengesetzten Beton unter dem genannten Schwellenwert von rd.  $0,4 \text{ M.-% Cl}^-/\text{kg Zement}$ :  $0,2$  bis  $0,25 \text{ M.-%}$ . Für Stahlbeton hält man einen doppelt so hohen Wert von rd.  $0,4$  bis  $0,5 \text{ M.-% Cl}^-/\text{kg Zement}$  für vertretbar. Chloridhaltige Betonzusatzmittel sind verboten.

Der Schutz von Stahlbeton und Spannbeton gegen Chlorideinwirkung wird zuverlässig durch eine ausreichend dicke und möglichst dichte Betondeckung erreicht, wie schadensfreie Bauwerke im Meer beweisen. Zusätzlichen Schutz bieten Epoxidharzbeschichtungen des Stahles. Im Offshorebau haben sich verzinkte Betonstähle als widerstandsfähig erwiesen.

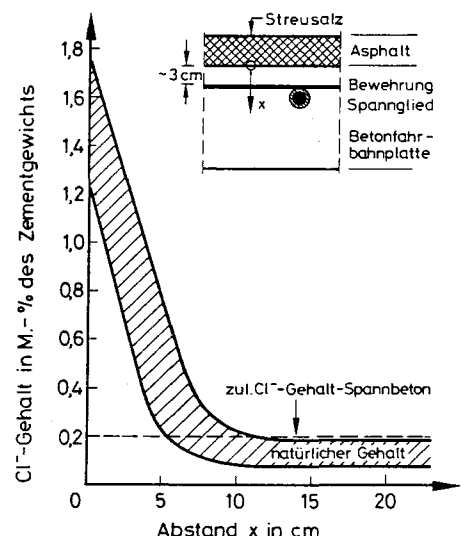


Bild 5.7.84 Verlauf der  $\text{Cl}^-$ -Konzentration in einer Fahrbahnplatte

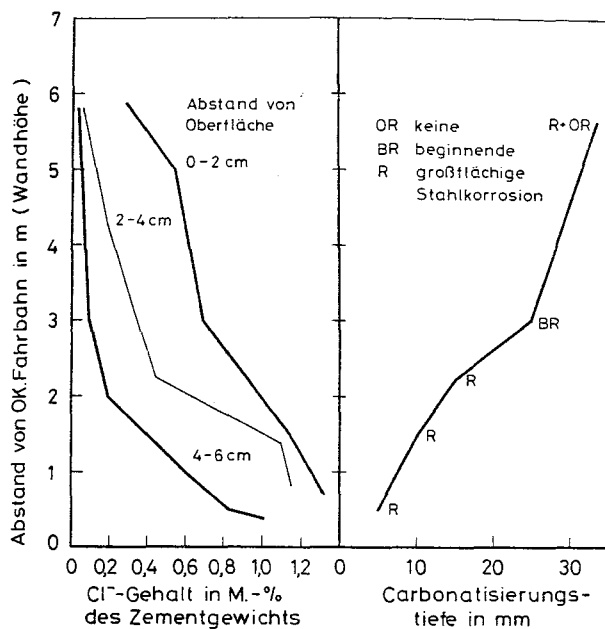


Bild 5.7.85 Chloridgehalt, Carbonatisierung und Korrosion an Wänden entlang Berliner Stadtautobahnen [73]

#### Spannungsrißkorrosion von Spannstahl

Die gegenüber Betonstahl erheblich festeren Spannstähle weisen bezüglich Werkstoffempfindlichkeit gegenüber bestimmten korrosiven Medien und wegen der hohen Dauerzugspannungen jene Merkmale auf, unter denen nach Abschnitt 5.3 verzögerte Sprödbüche infolge Spannungsrißkorrosion auftreten können.

Tatsächlich traten in den vergangenen Jahren in einer Reihe von Fällen Spannstahlbrüche auf. Die Stähle brachen dabei im gespannten Zustand, und zwar sowohl in noch nicht mit Einpreßmörtel verfüllten Hüllrohren (Bauzustand) als auch in verpreßten Hüllrohren nach längerer Gebrauchsdauer [74, 75]. Die Ursachen dieser verzögerten Brüche sind vielfältiger Natur. Sie beruhen in der Regel auf kathodischer SpRK, bei der, ausgehend von lochfraßartigen Narben, das Eindringen von atomarem Wasserstoff in Schwachstellen der Metallgitter stattfand (Wasserstoffversprödung).

Bei den Brüchen von gespannten Stählen in noch nicht verpreßten Hüllrohren stellte man Betonwasser fest, die durch Undichtigkeiten ins Hüllrohr gelangt waren. Diese Betonwässer waren zwar alkalisch, enthielten jedoch erhebliche Anreicherungen von Sulfat- und Chloridionen aus der Hydrolyse des Zements. Diese Stoffe können ebenso wie Schwitzwasser im Hüllrohr zu örtlichem Angriff mit Narbenbildung geführt haben. In manchen Fällen wurden auch die eine SpRK begünstigenden Promotoren wie Rhodanide aus Betonzusatzmitteln gefunden.

Brüche an Spannstählen in verpreßten Hüllrohren traten häufig bei größeren Verpreßfehlern, bei durchlässiger und zu geringer Betondeckung (Passivitätsverlust durch örtliche Carbonatisierung) und an konstruktiven Spalten auf.

Die Beobachtungen unterstreichen, gerade für die gegenüber Betonstahl höherfesten und empfindlicheren Spannstähle, die Wichtigkeit des alsbaldigen Schutzes durch sorgfältige Hüllrohrinjektion (s. [N 7]).

#### 5.7.8.10 Vorbeugender Schutz von Betonbauwerken

##### Vorbemerkungen

Sachgerecht zusammengesetzter, verarbeiteter und nachbehandelter Beton der Festigkeitsklasse B 25 und höher ist gegenüber normalen Witterungsbedingungen ohne jede Unterhaltung dauerhaft. Bei erhöhtem physikalischen und chemischen Angriff muß sein Widerstand durch vorbeugende Schutzmaßnahmen erhöht werden. Der einer Beanspruchung und einer geplanten Lebensdauer angepaßte Widerstand richtet sich vor allem nach der Intensität des Angriffs.

Im Falle des überwiegend chemischen Angriffs (Betonkorrosion) ist die Beurteilung der Angriffsstärke nach DIN 4030 möglich. Für überwiegend physikalische Angriffe, wie Frost-Tauwechsel u. a., fehlen derartige Kriterien. Völlig offen ist die Einstufung zusammengesetzter Beanspruchungen. Vor allem im Ausland versucht man, einheitliche Konzepte für die Bauwerkszuverlässigkeit zu entwickeln, die Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit für eine vorgegebene Lebensdauer vereinen.

Die Intensität des Angriffs kann für die meisten Fälle der Praxis zwischen schwach und stark eingestuft werden, wobei die Angriffsgrade der DIN 4030 unabhängig von der Herkunft des Angriffs benutzt werden (Bild 5.7.86). In diesen Fällen wird die Dauerhaftigkeit der Betonbauteile durch den Werkstoff Beton allein, ohne irgendwelche passive Schutzhäute, gesichert: Aktiver Schutz.

Daneben gibt es chemische bzw. gemeinsam mit diesen auftretende physikalische Angriffe, denen Betonbauteile auf Dauer nicht widerstehen können. In diesen Fällen reicht die aktive Schutzwirkung des Betons nicht aus, und die Dauerhaftigkeit ist durch Überzüge zu sichern: Passiver Schutz.

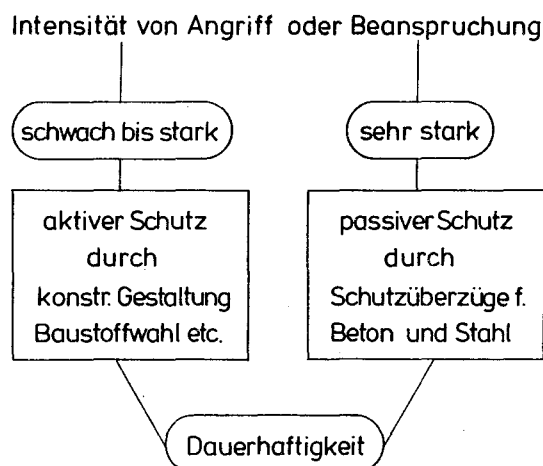


Bild 5.7.86 Angriff, Schutz und Dauerhaftigkeit

##### Aktiver Schutz

Der aktive Schutz eines Betonbauteils erfordert Maßnahmen in folgenden Bereichen:

Wahl der Betonausgangsstoffe und der Betonzusammensetzung in Abhängigkeit vom Angriff

Schalungs-, Beton- und Bewehrungsarbeiten auf der Baustelle  
 Formung und konstruktive Durchbildung von Bauwerk und Bauteil  
 Überwachung und Inspektion

Die Zusammensetzung von dauerhaftem Beton erfolgt nach Erfahrungsregeln, die Eingang in Normen gefunden haben. Obwohl Dauerhaftigkeit und Betondruckfestigkeit über den Wasserzementwert innig zusammenhängen, darf die Festigkeit allein nicht als Maß für die Dauerhaftigkeit verwendet werden. Dauerhafter Beton sollte ein B II-Beton sein, weil durch die hiermit festgelegten Kriterien der Eignung und Überwachung eine gleichmäßige und gezielte Güte am zuverlässigsten eingehalten werden kann.

a) Stoffe und Zusammensetzung von dauerhaftem Beton  
 Die Ausgangsstoffe Zement und Zuschläge müssen eine dem Angriff angepaßte Widerstandsfähigkeit besitzen. Die Zusammensetzung des Betons muß die optimale Verarbeitung und Verdichtung erlauben. Zementstein und Zuschlag sollen in ihrem physikalisch-chemischen Verhalten aufeinander abgestimmt sein, damit zum einen die unvermeidliche Unverträglichkeit klein bleibt und zum anderen eine innere Schädigungsreaktion nicht stattfindet (s. treibender Angriff). Zur Herstellung von dauerhaftem Beton sind alle Normzemente nach DIN 1164 geeignet. Starkem Sulfatangriff und der Gefahr des Alkalitreibens kann mit besonderen Zementen begegnet werden. Die Eignung der Zuschläge wird nach Normen überprüft und überwacht. Die Zuschläge für dauerhaften Beton müssen dicht und frostbeständig sein. Die wichtigste Eigenschaft für einen dauerhaften Beton ist dessen Dichtigkeit, die in erster Linie – dichte Zuschläge vorausgesetzt – von der Dichtigkeit des Zementsteins abhängt: Dauerhafter Beton muß wasserundurchlässig sein. Dies wird im wesentlichen durch eine Beschränkung des Wasserzementwerts erreicht. Der Frostwirkung und deren Überhöhung durch Enteisungsmittel wird durch die Zugabe von Mikroluftporen begegnet. In Bild 5.7.87 sind die wesentlichen Anforderungen für dauerhaften Beton in Abhängigkeit von der Beanspruchung aufgeführt; zusätzlich sind die Angaben von Tab. 5.7.9 zu beachten. Es ist zu empfehlen, niedrigere Wasserzementwerte, als in diesen Tabellen angegeben, zu verwenden.

b) Schalungs-, Beton- und Bewehrungsarbeiten  
 Rüstungen müssen steif und Schalungen dicht sein, um das Ausfließen von Zementleim zu vermeiden und um eine hohe Verdichtungsenergie aufbringen zu können. Verdichtung und Nachbehandlung müssen zu einer optimalen Dichtigkeit des Betons führen. Die Sicherung der Lage der Bewehrungsstäbe und Spannglieder und der Betondeckung ist sehr wichtig. Junger Beton ist reißgefährdet. Er benötigt deshalb Schutz vor ungünstigen Witterungsbedingungen.

c) Formung und Durchbildung  
 Hierunter sind planerische Maßnahmen zu verstehen, die zeitlich an erster Stelle stehen müssen. Auch im Betonbau muß die Forderung: »Korrosionsschutz beginnt am Reißbrett« beachtet werden. Baukörper und Bauteile müssen abhängig von der Herstellungsfolge und von möglichen Zwangwirkungen durch Fugen gegliedert werden, um Risse infolge Schwindens und Temperaturdifferenz zu vermeiden. Bewegungs- und Arbeitsfugen müssen sorgfältig durchgebildet und dauerhaft ausgeführt werden, damit sie nicht zu Schwachstellen werden [6]. Die architektonische Formung von Bauteilen und deren Oberflächen muß betongerecht sein. Beton ist ein einfacher

Bild 5.7.87 Einige betontechnologische Maßnahmen für dauerhaften Beton

Beanspruchung		Wasserzementwert	Wassereindringtiefe	Luftporengehalt bei 32 mm-Korn
		–	cm	Vol.-%
häufige oder ständige Durchfeuchtung		$\leq 0,6$ $d \leq 40$ cm $\leq 0,7$ $d > 40$ cm	$< 5,0$	– –
Frost-Tau-Wechsel und Auftausalze		$\leq 0,6$ $\leq 0,5-0,6$	$< 5,0$ $< 5,0$	$> 3,5$ $> 3,5$
chem. Angriff	schwach	$\leq 0,6$	$< 5$	–
	stark	$\leq 0,5$	$< 3$	–
	sehr stark	$\leq 0,5 + \text{Schutz}$	$< 3$	–

und grober Baustoff, der filigrane Gestaltung nicht verträgt (Prinzip: Möglichst kleine und abweisende Oberfläche; scharfe Bauteilkanten sind nicht betongemäß und neigen zu Ausbruch). Bewehrte Sichtbetonbauteile sollen nicht dünner als 10 cm sein; Vorsatzschalen von Fassadenelementen 7 cm nicht unterschreiten. Eine grobe Oberflächenstruktur (Waschbeton, Brettschalung, steinmetzmäßige Bearbeitung u. a.) ist witterungsunempfindlicher als eine glatte (Stahl-, Kunststoff-, Sperrholz-Schalung).

Die Wasserableitung ist zu planen. Der Regen ist gleichmäßig wie sein Anfall, auf breiter Front gestreut abzuleiten. Ständige Durchfeuchtungen durch Wasseransammlungen sind ebenso zu vermeiden, wie schlecht gespülte Bereiche, an denen sich Schmutz absetzt (s. [76] und [80]).

Die vorstehend genannten Regeln gelten auch für Ingenieurbauwerke, auch sie stellen Sichtbeton dar. Zur äußeren Formung tritt die innere konstruktive Durchbildung des Bauteils. Die meisten Schäden entstehen durch Korrosion von Betonstahl (Rostflecken, -absprengungen), weil Betondeckung und Stababstand entweder zu gering gewählt oder nicht zuverlässig durch Abstandshalter u. a. gesichert werden. Anhäufungen von Betonstahl können den Durchfluß des Frischbetons und dessen vollständige Verdichtung vereiteln. Durch sinnvolle Wahl und Aufteilung der Bewehrung ist die Breite unvermeidlicher Risse maßvoll klein zu halten [78].

Die Mindestdicke der erforderlichen Betondeckung (s. Bild 5.7.78) wird in DIN 1045 [N 1], abhängig von den künftigen Umweltbedingungen des Bauteils u. a., vorgeschrieben. Wegen der Verschärfung der Umwelteinflüsse und wegen Baustellenungenauigkeiten sollte eine um mindestens 0,5 cm größere Mindestdeckung gewählt werden als heute nach DIN 1045 verlangt wird.

#### d) Überwachung und Inspektion

Die Herstellung des Betons, die Beton- und Bewehrungsarbeiten auf der Baustelle müssen sorgfältig überwacht werden. Bauwerke, die starken Angriffen ausgesetzt sind, müssen während der Nutzungsdauer regelmäßig inspiziert werden, damit Schäden frühzeitig entdeckt und behoben werden können.

### Passiver Schutz

Unter der Voraussetzung, daß die zuvor geschilderten Maßnahmen des aktiven Schutzes von Beton getroffen werden, ist ein passiver Schutz von Beton nur im Falle des »sehr starken« chemischen Angriffs erforderlich. Der passive Schutz ist eine dem Angriff zugekehrte Schutzhaut, die die Betonoberfläche vom Angriffsmittel abschirmt. Da Fehlstellen in der Schutzhaut nicht auszuschließen sind, muß der Beton einem entsprechend starken Angriff nach Bild 5.7.87 ausgesetzt werden.

Die Haupteinsatzgebiete für den passiven Schutz liegen im eingeeordneten Bereich von Bauwerken sowie bei Anlagen mit sehr stark angreifenden Wässern oder wäßrigen Lösungen. Im eingeeordneten Bereich müssen die Abdichtungen häufig auch Schutzaufgaben übernehmen [81].

Zur Zeit ist eine mit DIN 55928 für Stahlbauten vergleichbare und umfassende Schutznorm für Betonbauten nicht vorhanden. Zahlreiche Normen, Merkblätter und Richtlinien stehen konkurrierend und ohne einheitliche Begriffssystematik nebeneinander. Tab. 5.7.17 und [80] geben einen Überblick über die Maßnahmen, die Schutzstoffe und die wichtigsten Vorschriften etc. In [N 9] und [N 10] wird die Eignung der Schutzstoffe gegen die verschiedenen Beanspruchungen bewertet. Wesentliche Anforderungen an die Stoffe sind neben der Schutzwirkung die Alkalienbeständigkeit, Wasserundurchlässigkeit, die gute Haftung auf Beton u. a. m.. Fugen müssen nach DIN 18540 [N 21] ausgeführt werden [58].

Die im Ausland praktizierte Verzinkung und Epoxidharzbeschichtung von Betonstahl stellen ebenfalls eine passive Schutzmaßnahme bei sehr starken Beanspruchungen dar (Seebau und Tausalz).

Aber nicht nur bei sehr starkem chemischen Angriff kann der Schutz der Oberfläche notwendig werden. Dieser Fall kann eintreten, wenn die Beanspruchung bei der Planung unterschätzt wurde oder wenn sich Mängel am Beton (zu hohe Durchlässigkeit) zeigen. Es wird dann notwendig, die Oberflächen zu beschichten (Imprägnieren, Versiegeln, Beschichten), um das Eindringen von Wasser und Schadstoffen zu verhindern.

Tab. 5.7.17 Maßnahmen und Stoffe für den passiven Schutz von Beton

Schutzmaßnahme	Stoffe	Techn. Regeln, Anwendungen
Spezialputze	Reaktionsharze	
keramische und metallische Beläge	säurefeste Klinker, nichtrostende Stähle	Industrieabwässer, chem. Flüssigkeiten
Beschichtungen (Schutzüberzüge) bei sehr starkem Angriff nach DIN 4030	bituminöse Stoffe, Kunstharzlacke, Kunststoffdispersionen, Reaktionsharze, Reaktionsharz/Teerpech	[N 20] sehr stark angreif. Wässer, Lösungen u. a.
Beschichtungen (Anstriche) bei ständiger Wassereinwirkung	bituminöse Stoffe u. deren Kombinationen mit Kunststoffen	[N 10] stark angreif. Wässer versch. Herkunft
Bauwerksabdichtungen gegen Wassereindringen	bituminöse Stoffe, Metallbänder, Kunststofffolien	[N 11] bis [N 13] stark bis sehr stark angreif. natürliche Wässer und Böden

### 5.7.8.11 Behebung von Schäden

Alle bisher besprochenen Maßnahmen sind vorbeugender Art. Teilweise durch deren Nichtbeachtung, teilweise durch Fehleinschätzung des Angriffs und wegen vieler anderer Gründe kann es zu Schäden an Betonbauwerken kommen. Diese Schäden stellen in der Regel eine Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit dar und führen glücklicherweise nur selten zu einem Bauteilversagen. Gleichwohl ist längerfristig mit Abnahme der Dauerhaftigkeit auch meist ein Verlust an Tragfähigkeit verbunden. Das frühzeitige Erkennen der Schäden, die Analyse der Ursachen sowie die fachgerechte und alsbaldige Behebung ist deshalb notwendig.

Es kann hier auf die Arten, Ursachen und Behebung von Schäden nicht eingegangen werden. Der Verweis auf Literatur [79], [80] und auf technische Regeln ([N 14] bis [N 19] u. a.) muß genügen.

wicht. Das Streben nach verbesserter Wärmedämmung und Gewichtersparnis mit einer der Beanspruchung angepaßten Festigkeit führte zur Entwicklung verschiedener Leichtbetonarten, die in Tab. 5.7.18 im Überblick gezeigt sind.

Bei einem belastbaren Beton ist das oben genannte Ziel nur durch den gezielten Einbau von Luft im Gefüge und/oder im Zuschlag erreichbar. Hierfür gibt es folgende Möglichkeiten, die in der Reihenfolge zunehmender Rohdichte und damit abnehmender Wärmedämmfähigkeit geordnet sind:

- Beton mit Haufwerksporigkeit und mit kornporigem Zuschlag
- Beton mit Haufwerksporigkeit und mit dichtem Zuschlag
- gefügedichter Beton mit kornporigem Zuschlag (Konstruktionsleichtbeton nach [N 2])

Die haufwerksporigen Leichtbetone werden vornehmlich für Wandbausteine seltener für Ortbeton- und Fertigteilwände eingesetzt ([81], [11]). Im folgenden werden der Konstruktionsleichtbeton ([N 2], [3], [5], [81] und [82]) und der zellporige Gasbeton [N 20] besprochen.

## 5.7.9 Einige Sonderbetone

### 5.7.9.1 Vorbemerkungen

Neben dem in den vorhergehenden Abschnitten behandelten Normalbeton hat die Praxis Sonderbetone mit den unterschiedlichsten Zielen entwickelt. Diese Ziele leiteten sich u. a. von der Art der Verarbeitung, vom Bauverfahren und von bestimmten notwendigen Festbetoneigenschaften ab. In [3] und [5] wird ein Überblick über Sonderbetone gegeben. Hier werden nur die tragenden Leichtbetone behandelt.

### 5.7.9.2 Leichtbetone

#### Bautechnische Bedeutung

Gemessen an seiner Druckfestigkeit ist die Wärmedämmfähigkeit von Normalbeton z. B. als Außenwandbaustoff völlig unzureichend. Ein weiterer Nachteil ist sein hohes Eigenge-

#### Konstruktionsleichtbeton

##### a) Vorbemerkungen

Bei der Entwicklung von Konstruktionsleichtbeton stand die Gewichtersparnis bei ansonsten wie für Normalbeton einstellbarer Druckfestigkeit im Vordergrund. Dieses Ziel wird mit den künstlich geblähten Leichtzuschlägen (Blähton, Blähschiefer und anderen Leichtzuschlägen) erreicht, die in Abschn. 5.7.2 bereits behandelt worden sind. Die Leichtzuschläge weisen bei angemessener Korneigenfestigkeit eine Kornporosität von bis zu 60 Vol.-% auf.

##### b) Festigkeitsklassen, Rohdichte und E-Modul

Tab. 5.7.19 zeigt die Festigkeitsklassen von Leichtbeton und Stahlleichtbeton [N 2]. Der Spannbeton wird in einem künftigen Teil von [N 7] geregelt werden.

Während bei Normalbeton die Festbetonrohichte unabhängig von der Festigkeit zu rd. 2,4 kg/dm<sup>3</sup> angesetzt werden kann, muß sie für Leichtbeton, in Abhängigkeit von der

Tab. 5.7.18 Überblick über Leichtbetonarten

Leichtbetonart	Anwendungsbeispiele	Zuschlagart bzw. Beispiel	Betontrockenrohichte	Betondruckfestigkeit	Wärmeleitzahl $\lambda$
			kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	W/mK
hochwärmedämmender Leichtbeton (nicht- bis selbsttragend)	Wärmedämmung von Flachdächern, Isolierbeton für Kühlhäuser	Blähglimmer, Holzspäne etc. Kunststoffschäum, Gas- u. Schaumbeton	0,2 bis 0,6	0,2 bis 2	0,05 bis 0,20
wärmedämmender u. belastbarer Leichtbeton	Außen- u. Innenwände im Hochbau, Dächer	Künstl. u. natürl. leichte Zuschläge, Gasbeton	0,6 bis 1,2	2 bis 15	0,20 bis 0,50
Konstruktionsleichtbeton (mäßig dämmend, wie Normalbeton belastbar, gefügedicht)	Bauwerke/-teile aus Beton, Stahlbeton u. Spannbeton	Blähton u. Blähschiefer	1,2 bis 2,0	15 bis 55	0,50 bis 1,30

Tab. 5.7.19 Festigkeitsklassen für Leichtbeton und Stahlleichtbeton mit geschlossenem Gefüge [N 2]

Leichtbeton- gruppe	Festigkeits- klasse	Nennfestigkeit $\beta_{WN}^4$	Serienfestigkeit $\beta_{WS}^4$	Anwendung
		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
B I <sup>1</sup>	LB 8	8	11	Für unbewehrte Bauteile. Als Stahl- leichtbeton für Wände Fassaden- u. Brüstungselemente
	LB 10	10	13	
	LB 15	15	18	unbewehrter Leichtbeton und Stahl- leichtbeton
	LB 25 <sup>2</sup>	25	29	unbewehrter Leichtbeton, Stahlleicht- und Spannbeton
B II	LB 35	35	39	
	LB 45	45	49	
	LB 55 <sup>3</sup>	55	59	

1 stets mit Eignungsprüfung

2 LB 25 für Spannbeton ist als B II zu behandeln

3 Zustimmung im Einzelfall oder mit Zulassung

4 Definition wie bei Normalbeton

Tab. 5.7.20 Rohdichteklassen und Rechenwerte  
des E-Moduls für Leichtbeton  
mit geschlossenem Gefüge

Roh- dichte- klasse	Grenzwerte der Trocken- rohdichte	Druck- E-Modul	ungefähre Zuordnung zu LB
	kg/dm <sup>3</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	
1,0	0,80 bis 1,0	5	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="text-align: center;">             ↑ LB 8–10 ↓           </div> <div style="text-align: center;">             ↑ 10–15 ↓ 15–25 ↑ 25–35 ↓ 35–55 ↑ ↓           </div> </div>
1,2	1,01 bis 1,2	8	
1,4	1,21 bis 1,4	11	
1,6	1,41 bis 1,6	15	
1,8	1,61 bis 1,8	19	
2,0	1,81 bis 2,0	23	

Betonzusammensetzung und der Festigkeit, festgelegt werden. Tab. 5.7.20 zeigt die Rohdichteklassen, die Rechenwerte des Druckelastizitätsmoduls und deren ungefähre Zuordnung zur Festigkeitsklasse.

#### c) Betonzusammensetzung und -verarbeitung

Konstruktionsleichtbeton wird ganz oder teilweise aus Leichtzuschlägen zusammengesetzt. Die Regelsieblinien von DIN 1045 können angewandt werden, das Größtkorn beträgt 25 mm. Da Leichtzuschläge mit Zunahme des Korndurchmessers eine Zunahme der Kornporigkeit und damit eine Abnahme der Kornrohdichte aufweisen, muß die Kornzusammensetzung bzw. die Sieblinie in Stoffraumanteilen je Fraktion gebildet werden.

Leichtzuschläge sind wassersaugend und können dem Frischbeton Wasser entziehen. Dieser Wasserentzug ist um so größer, je geringer die Eigenfeuchte des Leichtzuschlags vor Aufgabe in den Mischer und je poriger er ist. Die vom Leichtzuschlag während der Zeitspanne vom Mischen bis zum endgültigen Einbau aus dem Frischbeton aufgesaugte Wassermenge läßt sich abschätzen:

An trockenen Proben jeder Fraktion wird die bei einer 30-minütigen Wasserlagerung aufgesaugte Wassermenge  $W_{30}$  bestimmt. Die Differenz zwischen  $W_{30}$  und der Eigenfeuchte  $W_E$  wird der zur Erhärtung des Zementsteins wirksamen Wassermenge zugeschlagen. Damit ist mit

$$\text{wirks } W = wZ$$

$$\text{ges } W = \text{wirks } W + W_{30} - W_E.$$

Die Stoffraumrechnung erfolgt auf übliche Weise; die Wassermenge ( $W_{30} - W_E$ ) benötigt keinen eigenen Stoffraumanteil. Die Zusammensetzung von Leichtbeton bestimmter Konsistenz und Festigkeit erfordert viel Erfahrung und stets Eignungsversuche.

Der Zementgehalt muß mindestens 300 kg/m<sup>2</sup> betragen, aber unter 450 kg/m<sup>3</sup> liegen (Gefahr von Rissen infolge Hydratationswärmeabfuhr und Schwinden). Bei Normalbeton ist die Festigkeit der Zuschläge in der Regel höher als die des Zementsteins, weshalb Betondruckfestigkeit und Mörtelfestigkeit identisch sind:  $\beta_{Db} = \beta_{Dm}$ . Diese Tatsache erlaubte die Aufstellung der Wasserzementwert-Regel. Leichtzuschläge hingegen sind, wie aus Bild 5.7.88 abzulesen ist, nur in einem Teilbereich fester als oder gleichfest wie der Mörtel. Dieser Teilbereich nimmt mit der Korneigenfestigkeit und mit der Kornrohdichte zu. Ab den dargestellten Punkten wächst die Leichtbetonfestigkeit weniger als die Mörtelfestigkeit an, weil die Körner zunehmend zerdrückt werden. Der Wasserzementwert allein ist also kein Maßstab für die Leichtbetondruckfestigkeit.

Die für Leichtbeton geeignete Konsistenz ist K2, weil der Leichtzuschlag in weichem Beton zum Aufschwimmen

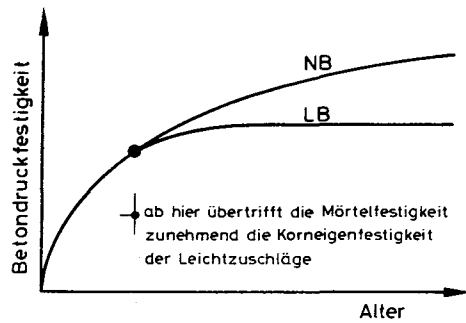


Bild 5.7.88 Zusammenhang zwischen Mörtel- und Betondruckfestigkeit bei Normalbeton und Leichtbeton (schematisch)

neigt und K1-Leichtbeton schwerer als Normalbeton verdichtbar ist. Eine ausreichend lange feuchte Nachbehandlung ist für Leichtbeton besonders notwendig.

#### d) Festbetoneigenschaften

Die Druckfestigkeit von Leichtbeton wird in erster Linie von der Korneigenfestigkeit der Zuschläge und in zweiter Linie von der Zementsteinfestigkeit bestimmt. Die Druckfestigkeit steigt mit der Kornrohichte (Maß für Korneigenfestigkeit) an, dabei nimmt aber auch die Betonrohichte zu. Die Fraktionen eines zugelassenen Leichtzuschlages werden in der Regel in zwei und mehr Kornrohichteklassen hergestellt. Damit gelingt es, eine angestrebte Betonrohichte mit einer daran angepaßten Druckfestigkeit des Leichtbetons zu paaren.

Leichtbeton weist bei gleicher Nachbehandlung eine geringere Nacherhärtung als Normalbeton auf: Bei Normalbeton überholt die Mörtelfestigkeit die Zuschlagfestigkeit niemals. Bei Leichtbeton ist dies jedoch ggf. der Fall, wie in Bild 5.7.89 schematisch dargestellt ist.

Wie Tab. 5.7.20 zeigt, ist der Druck-E-Modul von Leichtbeton geringer als der von Normalbeton gleicher Festigkeit, weil der porige Leichtzuschlag eine geringere Steifigkeit als natürlicher Zuschlag besitzt. Die Leichtzuschlagart und -rohichte sind von Einfluß.

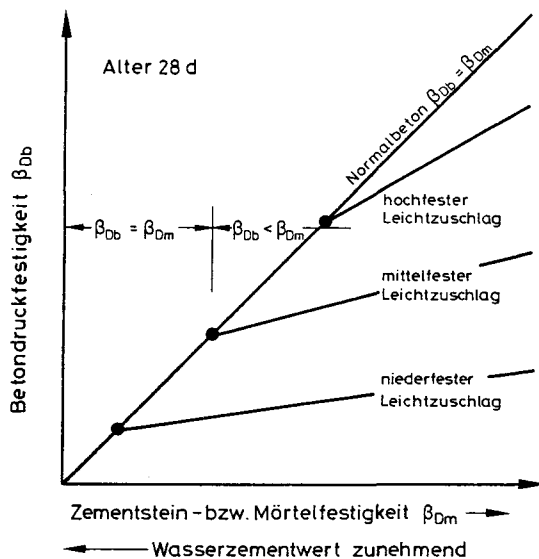


Bild 5.7.89 Festigkeitsentwicklung von Normal- und Leichtbeton

Bei gleicher Festigkeit und gleicher Kriechspannung zeigt Leichtbeton die größeren Kriechdehnungen  $\epsilon_k$  als Normalbeton. Die Kriechzahl  $\varphi$  hingegen steigt nicht an, weil die elastische Dehnung von Leichtbeton größer ist, s. Abschn. 5.7.7.3. Das Schwinden von Leichtbeton hängt von der Korneigenfeuchte ab. Bei einer hohen Korneigenfeuchte wird das Betonschwinden insbesondere im ersten Jahr stark verzögert. Bei geringer Korneigenfeuchte stellt sich bei Leichtbeton ein 20 bis 50% höheres Schwindmaß als bei Normalbeton ein. In einem Leichtbetonbauteil ist bei Austrocknung in der oberflächennahen Schicht ein steileres Feuchtegefälle als bei Normalbeton vorhanden. Dies führt zu Schwindeigenspannungen und ggf. zu feinen Netzsrisen.

Die Wärmedehnzahl von Leichtbeton ist etwas geringer als die von Normalbeton. Für raumabschließende Bauteile können wegen der gegenüber NB niedrigeren Wärmeleitzahl  $\lambda$  einschichtige Ausführungen gewählt werden. Tab. 5.7.21 enthält die Rechenwerte von  $\lambda$  in Abhängigkeit von der Rohdichteklasse.

Tab. 5.7.21 Wärmeleitzahlen von gefügedichtem Leichtbeton aus Blähton und -schiefer

Betontrockenrohichte kg/dm <sup>3</sup>	Wärmeleitzahl in W/mK	
	a	b
0,8	–	0,30
0,9	–	0,35
1,0	0,47	0,38
1,1 1,2	0,59	0,44 0,50
1,3 1,4	0,72	0,56 0,62
1,5 1,6	0,87	0,67 0,73
1,8	0,99	–
2,0	1,16	–

a ohne besonderen Nachweis

b ausschließlich bei Verwendung von Zuschlägen mit porigem Gefüge nach DIN 4226 Teil 2 und bei zusätzlicher Güteüberwachung

Besitzt der Leichtzuschlag eine dichte Sinterhaut, so besteht im Vergleich zu Normalbeton gleicher Güte kein Unterschied bezgl. Wasseraufnahme, Wasserundurchlässigkeit, Wasserdampfdurchlaßwiderstand sowie Frost- und Tausalzwiderstand, weil diese Eigenschaften vornehmlich von der Dichtigkeit des Zementsteins abhängen.

Die höhere Wärmedämmfähigkeit des Leichtbetons wirkt sich auf den Feuerwiderstand günstig aus, weil das Eindringen von Wärme zur Bewehrung verzögert wird.

#### Gasbeton

##### a) Vorbemerkungen

Gasbeton ist ein Baustoff vorzüglicher Wärmedämmfähigkeit bei einer für mäßige Beanspruchungen angepaßten Druckfestigkeit. Seine Struktur weist eine feinste Kugelpo-

rigkeit auf, weshalb auch von Porenbeton gesprochen wird. Gasbeton ist ein Fertigprodukt, das in Form von Mauersteinen, Decken- und Wandplatten im Hoch- und Industriebau breite Anwendung findet. Normen siehe in [82].

#### b) Herstellung

Gasbeton wird in Werken hergestellt. Die Ausgangsstoffe sind Zement und Kalk, feinsten Quarzsand, Wasser und ein Treibmittel; mit ihnen wird ein weicher Mörtel hergestellt. Das Treibmittel (meist Aluminiumpulver) reagiert mit dem Calciumhydroxid und bläht den Mörtel im weichen Zustand auf. Durch eine anschließende Dampfdruckhärtung im Autoklaven bei einem Druck von rd. 10 bar und einer Temperatur von rd. 175 °C wird eine sehr hohe Frühfestigkeit und ein sehr geringes Nachschwinden erzielt. Man bezeichnet diesen Vorgang als hydrothermale Verfestigung. Im Anschluß an die Fertigung werden die Fertigprodukte durch Sägen mit hoher Maßgenauigkeit fertiggestellt. Dies und die leichte Ver- und Bearbeitbarkeit des Gasbetons auf der Baustelle sind sehr vorteilhafte Eigenschaften.

#### c) Festbetoneigenschaften

Rohdichte und Festigkeit hängen eng zusammen. Tab. 5.7.22 gibt einen Überblick über die Festigkeitsklassen,

Rohdichten und Wärmeleitzahlen (aus [82]). Die Druckfestigkeit nimmt mit dem Feuchtigkeitsgehalt ab. Biegezug- und Zugfestigkeit liegen vergleichsweise hoch. Der niedrige E-Modul wirkt einer Rißgefahr entgegen.

Die Verformungen infolge Schwinden, Quellen und Kriechen sind deutlich geringer als von Konstruktionsleichtbeton. Da die kapillare Wasseraufnahme von Gasbeton sehr gering ist, ist sein Widerstand gegen Witterung und Frost hoch. Die Dampfdurchlässigkeit von Gasbeton ist ebenfalls hoch. Die niedrige Wärmeleitzahl wirkt sich für den Feuerwiderstand von bewehrtem Gasbeton günstig aus.

Durch die Dampfdruckhärtung besitzt Gasbeton nicht die hohe Basizität von Normal- oder Leichtbeton. Bewehrungsstahl muß deshalb in Anbetracht der hohen Gasdurchlässigkeit durch eine Schutzschicht vor Korrosion geschützt werden (Eintauchen in Bitumen).

#### d) Andere Arten von Porenbeton

Durch das Einrühren von stabilem organischem Schaum erzeugt man Schaumbeton, der für örtlich hergestellte Wärmedämmschichten auf Flachdächern, für Hohlraumverfüllungen u. a. vermehrt eingesetzt wird. Im Ausland wurden Porenbetone mit Filteraschen u. a. hergestellt.

Tab. 5.7.22 Einige Eigenschaften von Gasbeton

Baustoff-Kurzzeichen Festigkeitsklasse	Betonrohddichte kg/dm <sup>3</sup>	Rechenwerte der Wärmeleitzahl W/mK	Verwendung
	0,50 bis 0,80	0,22 bis 0,29	Gasbeton-Bauplatten nach DIN 4166 mit normaler Fugendicke
G2	0,40 bis 0,50	0,15 bis 0,16	Mauerwerk aus Gasbeton-Plansteinen nach Zulassungsbescheiden der Hersteller
G4	0,60 bis 0,70	0,22 bis 0,24	
G6	0,80	0,27	
	0,50 bis 0,80	0,19 bis 0,27	dünnfugig verlegte Gasbeton-Bauplatten nach DIN 4166
GB3,3	0,50 bis 0,60	0,16 bis 0,19	großformatige bewehrte Bauteile nach DIN 4223 u. Zulassungsbescheid
GB4,4	0,70	0,21	
G2	0,50	0,22	Mauerwerk aus Gasbeton-Blocksteinen nach DIN 4165
G4	0,70 bis 0,80	0,27 bis 0,29	
G6	0,80	0,29	

### 5.7.10 Mörtel

#### Bautechnische Bedeutung

In diesem Abschnitt werden Mörtel besprochen, die durch die anorganischen, mineralischen Bindemittel von Abschn. 5.6 verfestigt und für die natürliche oder künstliche Zuschläge nach Abschn. 5.7.2.5 verwendet werden. Bei gleicher Struktur wie Beton ist die Gefügeheterogenität der Mörtel geringer, weil der Größtkorndurchmesser des Zuschlags 8 mm meist nicht überschreitet.

Die Mörtel besitzen folgende Aufgaben:

- Schub- und druckfeste Verbindung zwischen einzelnen Bauelementen. Beispiel: Mauermörtel.
- Ebene Beläge auf Decken und Wänden als Witterungsschutz, als Untergrund für Ausbauschichten, -beläge als Verschleißschicht u. a. Beispiel: Putzmörtel.
- Ebene Beläge auf Bauteilen zum Schall-, Wärme- und Brandschutz. Beispiel: Schwimmender Estrich.
- Einpreßmörtel für den permanenten Korrosionsschutz im Spannbetonbau.



Darüber hinaus werden Mörteln zahlreiche andere Aufgaben zugewiesen. Näheres siehe in [3] und [87], hier ist nur eine knappe Darstellung möglich.

#### Mörtelarten

In der Praxis sind folgende Unterscheidungen gebräuchlich:

- Anwendungsart; Beispiele: Putz- und Mauermörtel
- Bindemittelart; Beispiele: Zement- und Gipsmörtel
- Verarbeitungsart; Beispiel: Einpreßmörtel

Im folgenden werden die Mauer-, Putz-, Estrich- und Einpreßmörtel in Grundzügen behandelt.

#### Mauermörtel

##### a) Aufgaben

Der Mauermörtel hat die Aufgabe, Mauersteine zum Verbundbaustoff Mauerwerk zu verbinden. Er muß die Mauersteine zur kraftschlüssigen Verbindung vollflächig lagern und im frischen Zustand Ungenauigkeiten ausgleichen. Bei Außenmauerwerk hat er die Stoßfugen gegen Witterungseinfluß abzudichten.

##### b) Unterscheidungen

In der Praxis werden Unterscheidungen nach folgenden Gesichtspunkten vorgenommen:

- Bindemittel wie Zementmörtel u. a.
  - Erhärtungsvorgang wie Luftmörtel und hydraulischer Mörtel
  - Zuschlagart wie Normal- und Leichtmörtel
  - Anwendung wie Normal- oder Dünnbettmörtel
  - Herstellungsart wie Baustellen- oder Werkmörtel
- Mauermörtel werden in DIN 1053 geregelt.

##### c) Zusammensetzung

Die Bindemittel von Mauermörtel sind bereits in Abschn. 5.6 behandelt worden. Durch Zusatzmittel und -stoffe können

die Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften beeinflusst werden. Der natürliche Zuschlag oder der für Leichtmörtel verwendete künstliche Leichtzuschlag entspricht DIN 4226. Daneben werden auch künstliche organische Leichtzuschläge eingesetzt. Die Tab. 5.7.23 zeigt die Mörtelgruppen von DIN 1053, Teil 1 und deren Zusammensetzung in Raumteilen. Für hochbeanspruchtes ingenieurmäßiges Mauerwerk wird nur Zementmörtel verwendet.

#### Putzmörtel

##### a) Aufgaben, Anforderungen

Putz ist ein ein- oder mehrlagiger ebener Mörtelbelag auf den Bauteilen des Rohbaus [84, 87], der zahlreiche Aufgaben im Bereich der Bauphysik, des Ausbaues, des Brandschutzes u. a. m. zu übernehmen hat. Je nach Anwendungen werden folgende Anforderungen an den Putzmörtel gestellt. Bei Außenputz sind folgende Anforderungen zu erfüllen:

- gute Haftung auf dem Untergrund
- Witterungsbeständigkeit (Hitze, Frost, Niederschlag)
- Wasserdampfdurchlässigkeit
- Wasserundurchlässigkeit v. a. im eingeeordneten Bereich
- chemische und physikalische Verträglichkeit der Putzschichten untereinander und mit dem Untergrund
- Verschleißfestigkeit u. a. m.

An Innenputz werden folgende Anforderungen gestellt:

- gute Haftung auf dem Untergrund
- Ebenheit und Eignung für weitere Ausbauschichten
- Wasserdampfdurchlässigkeit und Feuchtespeichervermögen
- Verschleißfestigkeit u. a. m.

Die maßgebenden Putznormen sind: DIN 18550, DIN 18557 und DIN 18558.

Tab. 5.7.23 Zusammensetzung, Festigkeit und Anwendung von Mauermörtel nach DIN 1053, Teil 1 (Mischungsverhältnis in Raumteilen)

Mörtelgruppe	mittl. Druckfestigkeit N/mm <sup>2</sup>	Luft- u. Wasserkalk		Hydr. Kalk	hochhydr. Kalk, Putz- u. Mauerbinder	Zement	Natursandanteil <sup>1</sup> (lagerfeucht)	Anwendung
		Kalkteig	Kalkhydrat					
I	–	1					4	für Wanddicken ≥ 24 cm bis zu 2 Vollgeschosse
			1				3	
				1			3	
					1		4,5	
II	≥ 2,5	1,5				1	8	nicht für Gewölbe u. bewehrtes Mauerwerk. Die Gruppen II u. IIa dürfen nicht zusammen auf einer Baustelle verwendet werden
			2			1	8	
					1		3	
IIa	≥ 5		1			1	6	
					2	1	8	
III	≥ 10					1	4	uneingeschränkte Anwendung

1 Körnung in der Regel 0/2 mm, seltener 0/4 mm entspr. DIN 4226

#### b) Unterscheidungen

In der Praxis werden folgende Unterscheidungen getroffen und zwar nach:

- Putzart wie wasserabweisender Putz u. a.
- Putzanwendung wie Außen- oder Innenwandputz u. a.
- Putzlage wie Ober- oder Unterputz u. a.
- Bindemittel wie Gipsputz, Kalkputz
- Putzweise wie Kratzputz, Kellenputz u. a.

#### c) Putzaufbau

Der Putzgrund (Mauerwerk, Beton) muß maßgerecht, staubfrei, sauber, rau und nicht stark saugend sein. Ggf. ist zur Haftvermittlung ein Putzträger aufzubringen. Auf dem Putzgrund ist in der Regel ein Spritzbewurf mit grobkörnigem Zuschlag 0/7 mm, vor allem zur Haftvermittlung, aufzubringen. Hierauf wird der Unterputz und nach dessen Erhärtung der Oberputz aufgebracht. Der Unterputz dient dem Wetterschutz. Der Oberputz soll dünner als der Unterputz sein und ist Träger für Anstriche, Tapeten u. a. Der Oberputz ist möglichst dehnfähig einzustellen, um Temperaturunterschiede und Feuchtewechsel rißfrei mitmachen zu können. Die Regeldicke von Außenputz beträgt 20 mm, von Innenputz 15 mm.

#### d) Zusammensetzung

Tab. 5.7.24 enthält die Zusammensetzung der Putzmörtel nach DIN 18550, Teil 2. Die Bindemittel wurden bereits in Abschn. 5.6 behandelt; Kunstharze als Bindemittel werden in DIN 18558 erfaßt werden. Die natürlichen Zuschläge entsprechen denen von Mauermörtel. Tab. 5.7.25 enthält

die Korngrößen, abhängig von der Putzlage und Anwendung. Für Wärmedämmputze werden künstliche, mineralische Leichtzuschläge und andere verwendet.

Die Anwendung der Mörtelgruppen hängt von den Umgebungsbedingungen des Bauteils und vom Untergrund ab; [87] enthält Hinweise. Für Innenputze werden die Gruppen P IV und P V angewandt. Außenwandputze werden meist mit der Gruppe P II ausgeführt. Für Putze im Sockel- und eingedeten Bereich eignet sich die Gruppe P III.

Tab. 5.7.25 Sandkörnung von Putzen

Anwendung	Putzlage	Sandkörnung in mm
Außenwandputz	Spritzbewurf	0/7
	Unterputz	0/5
	Oberputz	0/3 bis 0/7
Innenwandputz	Spritzbewurf	0/3 bis 0/7
	Unterputz	0/3
	Oberputz	0/1 bis 0/2
Innendeckenputz	Spritzbewurf	0/5
	Unterputz	0/3
	Oberputz	0/1 bis 0/2

#### Estrichmörtel

##### a) Aufgaben

Estriche sind dünne, ebene Beläge aus Mörtel, die auf Betonunterkonstruktionen (z. B. Decken) aufgebracht wer-

Tab. 5.7.24 Zusammensetzung von Putzen in Raumteilen nach vorgesehener Neufassung von DIN 18550, Teil 2

Mörtelgruppe	Mindestdruckfestigkeit N/mm <sup>2</sup>	Mörtelart	Baukalk		hydr. Kalk	hochhydr. Kalk	Zement	Baugips		Anhydritbinder	Sand mm
			Luft- o. Wasserkalk Kalkteig	Kalkhydrat				Stuck-	Putz-		
P I	keine Anforderung	Luftkalk- oder Wasserkalkm.	1	1							3,5–4,0 3,0–4,0
		hydr. Kalkm.			1						3,0–4,0
P II	2,5	hochhydr. Kalkmörtel				1					3,0–4,0
		Kalkzementm.	1,5 oder 2				1				9,0–11,0
P III	10	Zementm. mit Luftkalkzus.		≤ 0,5			2				6,0–8,0
		Zementmörtel					1				3,0–4,0
P IV	2,5	Gipsmörtel						1			–
		Gipssandmörtel						1 oder 1			1,0–3,0
		Gipskalkmörtel	1 oder 1					0,5-1,0 o. 1-2,0			3,0–4,0
	Keine Anforderung	Kalkgipsmörtel	1 oder 1					0,1-1,0 o. 0,2-0,5			3,0–4,0
P V	2,5	Anhydritmörtel								1	≤ 2,5
		Anhydritkalkm.	1 oder 1,5							3	12

den und die sich mit diesen entweder fest verbinden oder von diesen durch Zwischenschichten getrennt sind [85 bis 87].

Estrichen werden beispielsweise folgende Aufgaben zugewiesen:

- Ebenheit für nachfolgende Ausbauschichten
- hohe Festigkeit, hoher Verschleißwiderstand
- Griffigkeit, Rutschfestigkeit
- Wasserundurchlässigkeit
- Beständigkeit gegen Mineralöle u. a.
- Wärme und Trittschalldämmung

Estriche sind z. Z. nach DIN 18353 und DIN 4109 genormt. Eine umfassende Estrichnorm DIN 18560 wird vorbereitet. Von der AGI (Arbeitsgemeinschaft Industriebau, Köln) werden Arbeitsblätter für Estriche, Industrieböden u. a. ausgegeben.

#### b) Unterscheidungen

In der Praxis werden folgende Unterscheidungen getroffen und zwar nach:

- Konstruktion wie Verbundestrich u. a.
- Lagenzahl, Schichtenzahl wie einlagiger Estrich u. a.
- Bindemittel wie Zementestrich u. a. und nach anderen Gesichtspunkten.

#### c) Konstruktion

Für mittelschwere bis schwere Beanspruchungen während der Nutzung wird der Verbundestrich gewählt, der unmittelbar oder über Ausgleichsschichten auf die Betonunterkonstruktion aufgebracht wird. Die Tragschicht ist dann meist bereits erhärtet. Durch eine Zwischenschicht ist eine Tren-

nung möglich, durch die die freie Verformung bei unmittelbarem Druckkontakt erlaubt wird. Beim schwimmenden Estrich werden dickere Trennschichten aus Stoffen für die Wärme- und Trittschalldämmung angewandt [86].

#### d) Zusammensetzung

Die mineralischen Bindemittel Zement, Anhydrit und Gips werden überwiegend angewandt. Die für Industriefußböden geeigneten Hartstoffestriche sind ebenfalls zementgebunden und enthalten zur Erhöhung des Verschleißwiderstandes Hartstoffe z. B. aus Basalt, Elektrokorund u. a. Magnesia- und Gußasphaltestriche werden heute weniger angewandt. Trotz längerer Erhärtungsdauer wird der Zementestrich aus Kostengründen überwiegend verwendet.

Zementestrich eignet sich als Verbundestrich für mittlere Beanspruchung von Böden und v. a. als schwimmender Estrich. Der natürliche Zuschlag muß DIN 4226 entsprechen; der Größtkorndurchmesser beträgt für die üblichen Estrichdicken von 25 bis 45 mm i. a. 8 mm. Wegen der notwendigen hohen Festigkeit und um das Schwinden zu begrenzen, wird eine erdfeuchte Konsistenz des Estrichmörtels und ein niedriger W/Z-Wert gewählt. Üblicherweise wird PZ 35 F, bei kühler Witterung PZ 45 F eingesetzt. Die Kornzusammensetzung soll im günstigen Sieblinienbereich liegen.

Zementestrich ist im jungen Alter besonders rei ßgefährdet und muß deshalb ausreichend lange vor Austrocknung u. a. geschützt werden. Tab. 5.7.25 aus [87] zeigt die Anforderungen an Zementestriche (nach Neufassung von DIN 18560 werden sich Veränderungen ergeben). Durch Hartstoffe werden höhere Festigkeitsklassen geschaffen werden.

Tab. 5.7.25 Anforderungen an Zementestrich [87]

Anforderungen nach	Estrichfestigkeitsklasse	Art bzw. Beanspruchung		Mindestdruckfestigkeit nach 28 d N/mm <sup>2</sup>	Mindestbiegezugfestigkeit nach 28 d N/mm <sup>2</sup>	Abschleißverlust im Alter 28 d in cm <sup>3</sup> /50 cm <sup>2</sup> höchstens	Mindestestrichdicke mm
DIN 18353	ZE 15	Verbundestrich	zur Aufnahme von Belägen	15	–	–	30
	ZE 25		Nutzeestrich	25			
		Estrich auf Trennschicht		25			
AGI-Arbeitsblatt A11 für Industrieböden	ZE 25	Begehen, Lagern leichter Güter		25	4	15	Bei Verbundestrichen im allgemeinen mind. 30
	ZE 45	mittlerer, gummiberechtigter Fahrverkehr; Absetzen u. Kollern mittelschwerer Güter; Gleiten von stückigen und körnigen Gütern		45	6	9	
DIN 4109, Teil 4	ZE 25	schwimmender Estrich		~ 25	~ 4	–	je nach Zusammendrückung der Dämmschicht 35, 40 und 45

### *Einpreßmörtel*

Die Hüllrohre oder andere Spannkanaile des Spannbetons mit nachträglichem Verbund werden für den Dauerkorrosionsschutz der Spannkanaile mit Einpreßmörtel nach DIN 4227, Teil 5, unter Druck gefüllt. Über den Einpreßmörtel wird der Verbund zwischen Spannstahl und Bauwerksbeton hergestellt.

Der Einpreßmörtel ist in der Regel ein Mörtel aus Zement und Wasser, dem meist als Einpreßhilfe ein Zusatzmittel mit mäßiger Quellwirkung zugegeben wird. Der Wasserzementwert ist auf  $\leq 0,44$  zu beschränken, um das Wasserabsondern zu verhindern.

Wegen der oft großen Förderstrecke im Hüllrohr von 100 m und mehr muß der Einpreßmörtel ein gutes Fließvermögen besitzen, ohne während des Verpressens über Gebühr anzusteifen und ohne Wasser abzusondern. Beide Vorgänge können zu Verstopfungen führen. Der erhärtete Einpreßmörtel muß frostbeständig sein und im Alter von 28 Tagen eine mittlere Druckfestigkeit von 30 N/mm<sup>2</sup> aufweisen.

Die Güte und Vollständigkeit der Verpressung des Hüllrohrs, die möglichst bald nach dem Spannen des Stahls erfolgen muß, ist für die Dauerhaftigkeit der Spannbetonbauwerke entscheidend.

### *5.7.11 Normen, Richtlinien*

- [N 1] DIN 1045: Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung. 12.78.
- [N 2] DIN 4219: Leichtbeton und Stahlleichtbeton mit geschlossenem Gefüge. 2 Teile, 12.79.
- [N 3] DIN 4226: Zuschlag für Beton. 4 Teile, 04.83.
- [N 4] DIN 1048: Prüfverfahren von Beton. Teil 1, 12.78, Teil 2, 2.76, Teil 4, 12.78.
- [N 5] Fließbeton, Richtlinien für die Herstellung und Verarbeitung. 5.74.
- [N 6] DIN 1084: Überwachung (Güteüberwachung) im Beton- und Stahlbetonbau. 3 Teile, 12.78.
- [N 7] DIN 4227: Spannbeton; Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter oder voller Vorspannung. Teil 1, 12.79.
- [N 8] DIN 4030: Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase, 11.69.
- [N 9] Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton. Vorl. Richtlinie, Februar 1974.  
beton – Herstellung und Verwendung 24 (1974), S. 179/185 sowie Ergänzung 10.77.
- [N 10] Vorläufiges Merkblatt für Anstriche auf Beton von Wasser-Sammelanlagen. Herausg. Bundesverband der Zementindustrie 1980.
- [N 11] DIN 4031: Wasserdruckhaltende bituminöse Abdichtungen für Bauwerke, 3.78.
- [N 12] DIN 4117: Abdichtung von Bauwerken gegen Bodenfeuchtigkeit, 11.60.
- [N 13] DIN 4122: Abdichtung von Bauwerken gegen nicht-drückendes Oberflächenwasser und Sickerwasser mit bituminösen Stoffen, Metallbändern und Kunststoff-Folien, 3.78.

- [N 14] DIN 18551: Spritzbeton, Herstellung und Prüfung, Erläuterungen, 7.79, sowie Richtlinien für die Ausbesserung und Verstärkung von Betonbauwerken mit Spritzbeton. DAfStb 1976.
- [N 15] Merkblatt für Schutz und Instandsetzung von nicht-befahrenen Teilen der Bauwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton im Straßenwesen. Herausg. Forsch. Ges. f. d. Straßenwesen. Febr. 1976.
- [N 16] Merkblatt für die Ausbesserung von Oberflächen- und Kantenschäden an Betonfahrbahnen mit Kunstharzmörteln. Herausg. Forsch. Ges. f. d. Straßenwesen, in Vorb.
- [N 17] Merkblatt für die Unterhaltung und Instandsetzung von Fahrbahndecken aus Beton. Ausbesserung von Oberflächen- und Kantenschäden mit Zementmörtel 1976.
- [N 18] Merkblatt für die Anwendung von Reaktionsharzen im Betonbau. Herausg. Deutscher Betonverein 1978.
- [N 19] Merkblatt für die Instandsetzung von Betonbauteilen. Herausg. Deutscher Betonverein 1979.
- [N 20] Merkblatt für Schutzüberzüge auf Beton bei sehr starken Angriffen nach DIN 4030. Herausg. Bundesverband der Zementindustrie, 4.73.
- [N 21] DIN 18540: Abdichten von Außenwandfugen zwischen Beton- und Stahlbetonfertigteilen im Hochbau mit Fugendichtungsmassen. 3 Teile. 01.80

### *5.7.12 Literatur*

- [1] Neville, A. M.: Properties of concrete. 3. Auflage, Pitman Publ. Ltd. 1981.
- [2] Reinhardt, H. W.: Ingenieurbaustoffe. Wilh. Ernst & Sohn, 1973.
- [3] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile, Bd. 2, Nichtmetallisch-anorganische Stoffe. Beton, Mauerwerk, Bauverlag GmbH, 2. Auflage, 1981.
- [4] Betonhandbuch. Leitsätze für Bauüberwachung und Bauausführung. Herausg. Deutscher Beton-Verein e.V., Bauverlag GmbH, 1972.
- [5] Bonzel, J.: Beton. Beitrag im Beton-Kalender 1982, Teil 1, Wilh. Ernst & Sohn.
- [6] Praktische Betontechnik. Beton-Verlag GmbH, 1977
- [7] Weber, R., Schwara, H. und Soller, R.: Guter Beton. Ratschläge für die richtige Betonherstellung. 12. Aufl., Beton-Verlag GmbH, 1979.
- [8] Basalla, A.: Baupraktische Betontechnologie. Bauverlag GmbH, 4. Auflage, 1980.
- [9] Walz, K.: Herstellung von Beton nach DIN 1045. 2. Aufl., Beton-Verlag, 1972.
- [10] Krenkler, K.: Chemie des Bauwesens. Bd. 1, Anorganische Chemie. Springer-Verlag 1980.
- [11] Zement-Taschenbuch, 47. Ausgabe, 1979/80 und andere Ausgaben. Herausgeber: Verein Deutscher Zementwerke, Bauverlag GmbH, Beiträge zu Beton verschiedener Autoren, Baunormen, Richtlinien, Arbeitshilfen.
- [12] Rüschi, H.: Stahlbeton – Spannbeton, Bd. 1, Werkstoffeigenschaften und Bemessungsverfahren. Werner-Verlag, 1972.

- [13] Rüschi, H. und Jungwirth, D.: Stahlbeton – Spannbeton, Bd. 2, Berücksichtigung der Einflüsse von Kriechen und Schwinden auf das Verhalten der Tragwerke. Werner-Verlag, 1976.
- [14] Polymers in Concrete. Proc. 1st Int. Congress on Polymer Concrete 1975. Herausgeber Concrete Society, England, Construction Press 1976.
- [15] Walz, K.: Rüttelbeton. 3. Auflage, Verlag Wilh. Ernst & Sohn, 1960.
- [16] Czernin, W.: Zementchemie für Bauingenieure. Bauverlag GmbH, 3. Aufl. 1977.
- [17] Wierig, H. J.: Einige Beziehungen zwischen den Eigenschaften von »grünen« und »jungen« Betonen und denen des Festbetons. beton, Herstellung und Verwendung 21 (1971), S. 445/448 und 487/490.
- [18] Shah, S. P. und Winter, G.: Inelastic Behaviour and Fracture of Concrete. ACI SP-20. Proc. Symp. Causes, Mechanism, and Control of Cracking in Concrete, 1968, S. 5/28.
- [19] Winter, G.: The Role of Microcracking in Inelasticity and Fracture of Concrete. Festschrift H. Rüschi, Verlag W. Ernst & Sohn, 1969, S. 47/59.
- [20] Wittmann, F. und Zaitsev, Y.: Verformung und Bruchvorgang poröser Baustoffe unter kurzzeitiger Belastung und Dauerlast. DAFStb-Heft Nr. 232, 1974.
- [21] Shah, S. P. und Chandra, S.: Critical Stress, Volume Change and Microcracking of Concrete. J. ACI, Vol. 65, 1968, S. 770/781.
- [22] Rehm, G., Diem, P. und Zimbelmann, R.: Technische Möglichkeiten zur Erhöhung der Zugfestigkeit von Beton. DAFStb-Heft Nr. 283, 1977.
- [23] Wischers, G. und Lusche, M.: Einfluß der inneren Spannungsverteilung auf das Tragverhalten von druckbeanspruchtem Normal- und Leichtbeton. beton – Herstellung und Verwendung 22 (1972), S. 343/347 und 397/403.
- [24] Rasch, Ch.: Spannungs-Dehnungs-Linien des Betons und Spannungsverteilung in der Biegedruckzone bei konstanter Dehnungsgeschwindigkeit. DAFStb-Heft Nr. 154, 1962.
- [25] Hilsdorf, H.: Bestimmung der zweiachsigen Festigkeit des Betons. DAFStb-Heft 173, 1965.
- [26] Schickert, G. und Winkler, H.: Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung. DAFStb-Heft Nr. 277, 1977.
- [27] Rüschi, H.: Die Ableitung der charakteristischen Werte der Betonzugfestigkeit. beton – Herstellung und Verwendung 25 (1975), S. 55/58.
- [28] Heilmann, H. G.: Beziehung zwischen Zug- und Druckfestigkeit des Betons. beton – Herstellung und Verwendung 19 (1969), S. 68/70.
- [29] Noakowski, P.: Praxisgerechtes Verfahren für die Bemessung von Stahlbetonbauteilen bei Zwangbeanspruchung. Beton- und Stahlbetonbau 75 (1980), S. 77/82.
- [30] Concrete at Early Ages. Int. Konferenz der RILEM, Paris 1982.
- [31] Klieger, P.: Effect of Mixing and Curing Temperature on Concrete Strength. J. ACI, Vol. 54, June 1958.
- [32] Hilsdorf, H. K.: Austrocknung und Schwinden von Beton. Festschrift H. Rüschi, Verlag Wilh. Ernst & Sohn, 1969.
- [33] Kupfer, H.: Das Verhalten des Betons unter zweiachsiger Beanspruchung. Diss. T.U. München 1969.
- [34] Eibl, J. und Iványi, G.: Studie zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbeton. DAFStb-Heft Nr. 260. Verlag Wilh. Ernst & Sohn, Berlin, 1976.
- [35] Advanced Mechanics of Reinforced Concrete. IVBH-Kolloquium, Delft 1981, Prel. Report and Working Papers.
- [36] Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading. Interass. Symposium organ. von BAM Berlin, Juni 1982; Proceedings and Introductory Report.
- [37] Zielinski, A. J. und Reinhardt, W. H.: Impact Stress-Strain Behaviour of Concrete in Tension, in [36].
- [38] Zielinski, A. J., Reinhardt, H. W. und Körmeling, H. A.: Experiments on Concrete under Uniaxial Impact Tensile Loading. RILEM-Matériaux et Constructions, Vol. 14, No. 80, S. 103/112, 1981.
- [39] König, G. und Dargel, H. J.: A Constitutive Law for Reinforced Concrete with Consideration of High Strain Rates, in [36].
- [40] Ermüdungsverhalten von Stahl- und Betonbauten. IVBH Kolloquium, Lausanne 1982 (IABSE Reports Vol. 37).
- [41] Weigler, H.: Beton bei häufig wiederholter Beanspruchung. Betontechn. Berichte 1980/81, Beton-Verlag.
- [42] Schneider, U.: Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen. DAFStb-Heft Nr. 337, 1982.
- [43] Hilsdorf, H. K., Belli, W. und Seeberger, J.: Strength Characteristics of Structural Concrete in the Temperature Range 20 to 250 °C. 6. SMIRT Conference, paper H1/4, Paris 1981.
- [44] Wiedemann, G.: Zum Einfluß tiefer Temperaturen auf Festigkeit und Verformung von Beton. Diss. TU Braunschweig, 1982.
- [45] Wischers, G.: Aufnahme und Auswirkungen von Druckbeanspruchungen auf Beton. Betontechn. Berichte 1978, Betonverlag, Düsseldorf, S. 31/56.
- [46] Wischers, G. und Dahms, J.: Festigkeitsentwicklung des Betons. Zement-Taschenbuch 1976/77, S. 227/249.
- [47] Neville, A. M.: Creep of Concrete: Plain, Reinforced, and Prestressed. North Holland Publ. Co., Amsterdam 1970.
- [48] Rüschi, H., Jungwirth, D. und Hilsdorf, H.: Kritische Sichtung der Verfahren zur Berücksichtigung der Einflüsse von Kriechen und Schwinden des Betons auf das Verhalten der Tragwerke. Beton- und Stahlbetonbau 68 (1973), S. 49/60, 76/86 und 152/158.
- [49] Schneider, U.: Ein Beitrag zur Frage des Kriechens und der Relaxation von Beton unter hohen Temperaturen. Heft Nr. 42 des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Braunschweig, 1979.
- [50] FIP State of Art Report: Cryogenic Behaviour of Materials for Prestressed Concrete. Mai 1982.
- [51] Kordina, K., Rostásy, F. S. und Svensvik, B.: Tragfähigkeit und Verformung von Stahlbetonbalken unter Biegung und gleichzeitigem Zwang infolge Auflagerverschiebung. DAFStb-Heft Nr. 336, 1982.

- [52] Durability of concrete construction. ACI-Monograph No. 4, 1968.
- [53] Durability of concrete. ACI-SP-47, 1975.
- [54] Freezing and thawing of concrete – mechanisms and control. ACI-Monograph No. 3, 1966.
- [55] Walz, K.: Anleitung für beständigen Beton. beton – Herstellung und Verwendung (29) 1979, S. 254/257, S. 285/289, S. 323/327 und S. 360/365.
- [56] Weigler, H.: Beton – ein dauerhafter Baustoff. beton – Herstellung und Verwendung 25 (1975), S. 123/128.
- [57] Rostásy, F. S.: Zur Dauerhaftigkeit unserer Betonbauwerke. Kenntnisstand und Probleme. Mitt. der TU Braunschweig XIII (1978), H. V., S. 23/36.
- [58] Korrosion und Korrosionsschutz im konstruktiven Ingenieurbau. VDI-Berichte 285, 1977.
- [59] Polster, H. und Schunack, H.: Baustoffkorrosion und Korrosionsschutz. Schriftenreihe der Bauforschung, Reihe Technik und Organisation, Heft 29, 1969.
- [60] Durability of concrete structures. CEB-Bulletin No. 148, 1982.
- [61] Knöfel, D.: Stichwort: Baustoffkorrosion. Bauverlag GmbH, 2. Aufl., 1982.
- [62] Bonzel, J. und Manns, W.: Beton mit besonderen Eigenschaften. Zement-Taschenbuch 1979/80, S. 367/383.
- [63] Senbetta, E. und Scholer, C. F.: Absorptivity, a measure of curing quality as related to durability of concrete surfaces. 2. Int. Conf. on Durability of Building Materials and Components. Sept. 1981, USA, S. 153/159.
- [64] Setzer, M. J.: Einfluß des Wassergehalts auf die Eigenschaften des erhärteten Betons. DAfStb-Heft Nr. 280, 1977.
- [65] Rösli, A. und Harnik, A. B.: Zur Frost-Tausalz-Beständigkeit von Beton. Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 46, 1979.
- [66] Grübl, P.: Über die Rolle des Eises im Gefüge zementgebundener Baustoffe. beton – Herstellung und Verwendung 31 (1981), S. 54/58.
- [67] Springenschmid, R.: Grundlagen und Praxis der Herstellung und Überwachung von Luftporenbeton. Zement und Beton, H. 47, 1969.
- [68] Vorbeugende Maßnahmen gegen Alkalireaktion von Beton. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 40/1973.
- [69] Locher, F. W. und Sprung, S.: Ursache und Wirkungsweise der Alkalireaktion. beton – Herstellung und Verwendung 23 (1973), S. 303/353.
- [70] Sprung, S.: Beton für Meerwasserentsalzungsanlagen. beton – Herstellung und Verwendung 28 (1978), S. 241/245.
- [71] Verbeck, G.: Mechanisms of corrosion of steel in concrete. ACI SP 49-3, 1975, S. 21/38.
- [72] Soretz, St.: Korrosion von Betonbauten – ein neues Schlagwort. Zement und Beton 1979, S. 3/11.
- [73] Weyer, P. und Schulte, H.: Wenn Salz und Wasser Stein und Stahl zerstören. Consulting 1981, H. 6.
- [74] Rehm, G., Nürnberger, U. und Frey, R.: Zur Korrosion und Rißkorrosion bei Spannstählen. Werkstoffe und Korrosion 32 (1981), S. 211/221.
- [75] Rehm, G., Nürnberger, U. und Frey, R.: Zur Korrosion und Spannungsrißkorrosion von Spannstählen bei Bauwerken mit nachträglichem Verbund. Bauingenieur 56 (1981), S. 275/281.
- [76] Bächer, M. und Heinle, E.: Bauen mit Sichtbeton. Verlag J. Hoffmann, 1966.
- [77] Betonatlas. Beton-Verlag 1980. Herausgeber Bundesverband der Deutschen Zementindustrie.
- [78] Leonhardt, F. und einige Teile mit E. Mönning: Vorlesungen über Massivbau. 6 Teile, mehrere Auflagen ab 1972, Springer-Verlag.
- [79] Ruffert, G.: Schäden an Betonbauwerken. Verlagsgesellschaft R. Müller, 1982.
- [80] Dartsch, B.: Konservieren, Sanieren, Restaurieren. Techniken zur Instandsetzung von und mit Beton. Beton-Verlag, 1978.
- [81] Weigler, H. und Karl, S.: Stahlleichtbeton. Herstellung, Eigenschaften und Ausführung. Bauverlag GmbH, 1971.
- [82] Heufers, H.: Leichtbeton. Zementtaschenbuch, Bauverlag GmbH, 1979/1980.
- [83] Scholz, W.: Baustoffkenntnis, Werner Verlag.
- [84] Piepenburg, W.: Mörtel, Mauerwerk, Putz, Bauverlag GmbH. Wiesbaden, 6. Auflage, 1970.
- [85] Schütze, W.: Der schwimmende Estrich. Bauverlag GmbH, 4. Auflage, 1974.
- [86] Estrich im Hochbau. Forschungsgemeinschaft Bauen und Wohnen, H. 80, 1966.
- [87] Bonzel, J.: Baumörtel, Betonkalender 1982, I. Teil, S. 111/162.

## 5.8 Künstliche Steine

### 5.8.1 Allgemeines

Die künstlichen Steine besitzen als Mauersteine, Dachsteine, Rohre, Platten etc. eine große Bedeutung im Bauwesen. Sie sind anorganischer, mineralischer Herkunft und werden durch bestimmte Herstellverfahren geformt.

Nach den Ausgangsprodukten kann man die künstlichen Steine in keramische und mineralisch gebundene Baustoffe unterteilen. Unter keramischen Baustoffen werden dabei die aus tonigen Bestandteilen geformten und gebrannten Produkte verstanden. Die mineralisch gebundenen Baustoffe sind durch anorganisch-mineralische Bindemittel verfestigte Produkte.

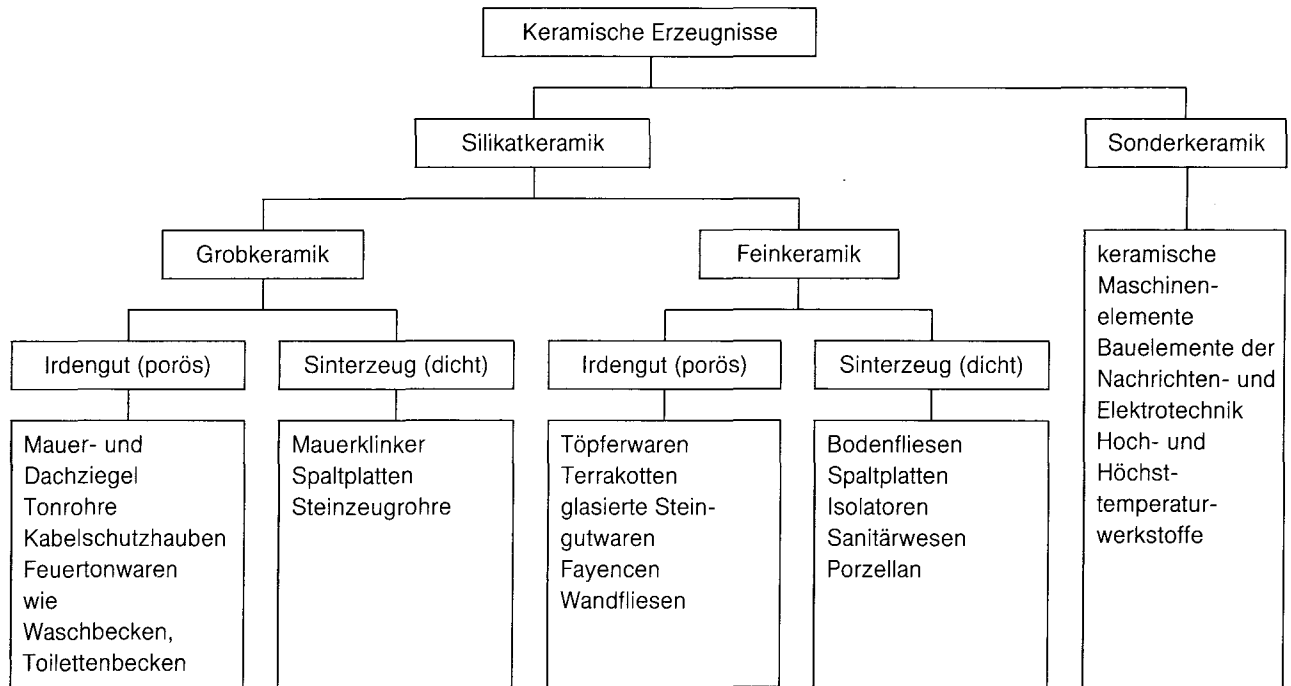
Die Einsatzgebiete der künstlichen Steine liegen sowohl im Roh- als auch im Ausbau und sind vielfältig. Mit Mauersteinen – nach Maßnormen geformt – wird der Verbundbaustoff Mauerwerk für tragende, aussteifende und nichttragende Wände hergestellt [1], [2] und [N 5]. Keramische Platten dienen als Beläge auf Außen- und Innenwänden sowie auf Böden. Darüber hinaus gibt es zahlreiche andere Anwendungsgebiete.

### 5.8.2 Keramische Baustoffe

#### 5.8.2.1 Einteilung

Die Entwicklung keramischer Baustoffe reicht bis ins Altertum zurück. Die ersten gebrannten Ziegel wurden etwa

Tab. 5.8.1 Einteilung der keramischen Erzeugnisse



4000 v. Chr. in Mesopotamien hergestellt. Aufgrund seiner relativ guten Wärme- und Schalldämmeigenschaften bei ausreichender Druckfestigkeit und aufgrund seines guten Aussehens hat der Ziegel im Wohnungsbau u. a. auch heute noch große Bedeutung.

Die keramischen Baustoffe können nach der Brenntemperatur in Irdengut (Steingut und Ziegel) und Sinterzeug (Steinzeug und Porzellan) unterteilt werden. Zum anderen unterscheidet man nach dem Aufbereitungsgrad zwischen Grob- und Feinkeramik. Bei grobkeramischen Produkten sind Unregelmäßigkeiten des Brennguts noch sichtbar. In Tab. 5.8.1 ist ein Überblick über die keramischen Erzeugnisse gegeben. Die Grundlagen der Keramik werden in [3] und [4] dargestellt.

### 5.8.2.2 Herstellung

#### Rohstoffe

Der wichtigste Rohstoff für die Herstellung keramischer Produkte, der Ton, entsteht durch Verwitterung von Feldspaten. Tone bestehen aus einem Gemisch von Tonmineralen (Aluminiumsilikate), chemisch und physikalisch gebundenem Wasser und Beimengungen wie Metalloxide, Quarz, Kalk, Sand, etc. Die Tonminerale (Kaolinit, Illit, Montmorillonit usw.) liegen in feindisperser, plastischer Form vor und erleichtern daher die Formgebung. Die Beimengungen sind grobdisperse, unplastische Bestandteile, die beim Brennen als Fluß-, Farb- oder Magerungsmittel wirken.

#### Brennen

Vor dem Brennen werden die Rohstoffe gemischt, in Strang- oder Stempelpressen zu Rohlingen geformt, anschließend getrocknet und dann gebrannt. Beim Brennprozeß laufen im wesentlichen folgende Vorgänge ab:

Bei etwa 120 °C wird das physikalisch gebundene und bei Temperaturen von 450–600 °C das chemisch gebundene Wasser ausgetrieben. Bei etwa 800 °C bilden sich unter Freisetzung von Kieselsäure neue Kristalle, die sich untereinander verflechten. Die Sinterung beginnt bei etwa 1000 °C. Dabei entstehen an den Randzonen der Mineralkörnchen Silikatschmelzen, die beim Abkühlen glasig erstarren. Die Glasanteile binden die ungeschmolzenen Minerale fest ein und bewirken so eine Verfestigung der keramischen Produkte. Der Scherben (Bruch einer gebrannten Tonmasse) ist dicht, hart und wasserbeständig.

Beim Brennprozeß findet also eine Verdichtung der Produkte statt, die sich in einer Volumenabnahme infolge Schwinden und in einer Abnahme der Porosität äußert. Durch die Höhe der Brenntemperatur können die Eigenschaften des keramischen Produkts beeinflusst werden. Hohe Brenntemperaturen sind mit einer Zunahme der Festigkeit, Dichte, der Witterungsbeständigkeit und der chemischen Widerstandsfähigkeit verbunden. Bei niedriger Brenntemperatur entsteht ein leichter, poröser und wärmedämmender Scherben.

#### Engoben und Glasuren

Die rauhe Oberfläche der keramischen Produkte kann durch Engoben oder Glasuren verschönert und farblich gestaltet werden, bei porösen Erzeugnissen erreicht man gleichzeitig eine abdichtende Wirkung.

Engoben werden vor dem Brennen durch Tauchen oder Besprühen auf den Formling aufgebracht. Sie bestehen aus feinkörnigen Tonmassen, die so ausgewählt sind, daß sich beim Brennen die gewünschte Färbung ergibt. Das Engobieren wird z. B. bei der Herstellung von Dachziegeln angewandt.

Glasurmassen bestehen aus einer wäßrigen Aufschlämmung von z. B. Feldspat, Marmor oder Magnesit, die als

dünne Überzüge aufgebrannt werden. Glasuren werden z.B. bei Wandfliesen, Kacheln, Steinzeugrohren und Porzellan eingesetzt.

### 5.8.2.3 Keramische Produkte und ihre Eigenschaften

#### Mauerziegel

Mauerziegel ist ein Sammelbegriff für diejenigen Ziegelerarten, die als Baustoffe für tragendes und nichttragendes Mauerwerk verwendet werden. In Tab. 5.8.2 ist ein Überblick über die Ziegelerarten nach [N 1] gegeben. In [5] werden Anwendungen beschrieben.

Mauerziegel werden als Vollziegel mit einem Lochanteil < 15% und als Hochlochziegel mit einem Lochanteil > 15% hergestellt. Die Ziegelformate sind in [N 1] festgelegt und auf die Maßordnung im Hochbau abgestimmt. Die geringe Rohdichte der Leichtziegel erreicht man durch Zugabe von porenbildenden Stoffen (Hartschaumteilchen, Sägemehl), die bei der Herstellung ausbrennen.

Nach den Verwendungseigenschaften können Mauerziegel in Hintermauer- und Vormauerziegel sowie Klinker eingeteilt werden. Für Hintermauerziegel wird keine Frostbeständigkeit gefordert; sie dürfen daher nur für Mauerwerk verwendet werden, das verblendet, geputzt oder mit einem anderen Schutz versehen wird. Die Frostbeständigkeit von Vormauerziegel ist durch Prüfung nachzuweisen. Klinker sind frostbeständige gesinterte Bausteine. Sie müssen säure- und laugenbeständig sein und dürfen keine treibenden Einschlüsse oder schädliche Stoffe enthalten, die ein Abblättern oder ein Ausblühen verursachen.

#### Dachziegel

Dachziegel werden in natürlicher Brennfarbe und mit engobierter oder glasierter Oberfläche in verschiedenen Formen und Abmessungen hergestellt. Nach der Herstellungsart unterscheidet man Strangdachziegel (Biberschwanzziegel, Hohlpfanne, Strangfalzziegel) und Preßdachziegel (Doppelfalzziegel, Flachdachpfanne, Mönch und Nonne). Dachziegel müssen frostbeständig und wasserundurchlässig sein. Ausblühfähige Salze, Kalkeinschlüsse sowie andere schädliche Stoffe dürfen nur in so geringen Mengen vorhanden sein, daß sie keine Schädigungen hervorrufen können [N 4].

#### Wand- und Bodenfliesen

Nach [N 12] sind Fliesen feinkeramische Wand- und Bodenbeläge aus Stein- bzw. Irdengut oder Steinzeug. Kennzeichnend für Wandfliesen ist der feinkörnige, kristalline, poröse, weiße (Steingut) oder getönte (Irdengut) Scherben mit einer Wasseraufnahme von mehr als 10 M.-%. Wandfliesen erhalten eine Glasur, die in der Regel in einem zweiten Brennvorgang aufgeschmolzen wird und ausreichend gegen Spritzwasser schützt. Sie sind jedoch nicht frostbeständig und dürfen daher nur für Innenräume verwendet werden. Bodenfliesen (Steinzeug) bestehen aus einem feinkörnigen, kristallinen, gesinterten, nicht mehr saugenden Scherben. Steinzeugfliesen werden unglasiert oder glasiert hergestellt, wobei die Glasur auf die Rohfliese aufgetragen und mit dieser zusammen gebrannt wird. Sie sind hart, frost-, laugen- und säurebeständig (außer Flußsäure) und sind für Außen- und Innenanwendung geeignet.

Tab. 5.8.2 Übersicht über die Ziegelerarten nach [N 1]

Ziegelerart	Kurzbezeichnung	Ziegelrohdichte <sup>1</sup> kg/dm <sup>3</sup> Mittelwerte	Scherben- rohdichte <sup>2</sup> kg/dm <sup>3</sup>	Druckfestigkeit N/mm <sup>2</sup> Mittelwerte
DIN 105, T. 1: <i>Vollziegel und Lochziegel</i>				
Vollziegel	Mz	1,0–2,2		5,0–35,0
Hochlochziegel	HLz	1,0–2,2		5,0–35,0
Vollklinker	KMz	1,0–2,2	≥ 1,9	min. 35,0
Hochlochklinker	KHLz	1,0–2,2	≥ 1,9	min. 35,0
DIN 105, T. 2: <i>Leichtziegel</i>				
Hochlochziegel	HLz	0,6–1,0	1,3–1,75	2,5–35,0
DIN 105, T. 3: <i>Hochfeste Ziegel und hochfeste Klinker</i>				
Vollziegel	Mz	1,0–2,5		45,0; 60,0; 75,0
Hochlochziegel	HLz	1,0–2,5		45,0; 60,0; 75,0
Vollklinker	KMz	1,0–2,5	≥ 1,9	45,0; 60,0; 75,0
Hochlochklinker	KHLz	1,0–2,5	≥ 1,9	45,0; 60,0; 75,0
DIN 105, T. 4: <i>Keramikklinker</i>				
Vollklinker	KK	1,2–2,5	≥ 2,0	75,0
Hochlochklinker	KHK	1,2–2,5	≥ 2,0	75,0

1 Ziegelrohdichte  $\rho_z$  = Gewicht des trockenen Ziegels/Volumen einschl. Hohlräume

2 Scherbenrohdichte  $\rho_{sch}$  = Gewicht des trockenen Ziegels/Volumen abzügl. Hohlräume



#### 5.8.2.4 Mauerwerksausblühungen

Ausblühungen entstehen durch Ablagerung von löslichen Salzen, die mit der Feuchtigkeit an die Oberfläche poröser Bauteile transportiert werden und dort beim Verdunsten der Feuchtigkeit auskristallisieren. Ausblühungen können nur dann auftreten, wenn lösliche Salze im Mauerwerk (Stein und/oder Mörtel) vorhanden sind bzw. in das Mauerwerk gelangen können und wenn Feuchtigkeit als Transportmedium zur Verfügung steht. Die Salzablagerungen sind chemisch gesehen vorwiegend Chloride, Sulfate und Nitrate. Chloride können über Frostschutzmittel oder durch falsche Behandlung mit Reinigungsmitteln in das Mauerwerk gelangen. Chloridausblühungen sind jedoch selten, da die Salze nur bei niedriger relativer Luftfeuchte auskristallisieren. Sulfate können nach dem Brennen noch im Ziegel vorhanden sein oder aus dem Grundwasser in das Mauerwerk aufsteigen. In Industriegebieten kann mit Schwefelverbindungen angereicherter Niederschlag zu Sulfatausblühungen führen. Sulfate bewirken vor allem bei häufigem Wechsel zwischen feucht und trocken Absprengungen durch Auskristallisation im Ziegelinneren.

Nitratausblühungen entstehen, wenn Stickstoffverbindungen in das Mauerwerk eindringen und mit dem Kalk des Mörtels reagieren. Durch den starken Kristallisationsdruck des sich bildenden Salzes, vor allem bei häufigem Feuchte-Trocken-Wechsel, und das Herauslösen des Kalkes wird das Mauerwerk mit der Zeit zerstört (»Mauerfraß«).

Kalkhaltige treibende Einschlüsse im Mauerziegel können zu Abplatzungen führen, da die Kalkeinschlüsse bei Berührung mit Wasser unter Wärme- und Dampfentwicklung ablöschen. Ausblühungen, die von kalkhaltigen Rohstoffen herrühren, sind häufig nicht schädlich, verursachen aber unschöne weiße Flecken an den Wänden. Kalkausblühungen werden mit der Zeit vom Regen abgewaschen. Sie können durch Reinigen mit verdünnter Salzsäure entfernt werden.

Mauerwerksausblühungen in Bodennähe können verhindert werden, wenn die Durchfeuchtung des Mauerwerks z. B. durch sorgfältige Abdichtung gegen Grundwasser und Bodenfeuchte unterbunden wird.

### 5.8.3 Mineralisch gebundene Baustoffe

#### 5.8.3.1 Kalksandsteine

Kalksandsteine werden aus gemahlenem ungelöschtem Kalk (etwa 8–10 M.-%) und kieselsäurehaltigen Zuschlägen (z. B. Quarzsand) unter Wasserzugabe hergestellt. Die intensiv vermischten Ausgangsstoffe werden unter Druck geformt und in Autoklaven unter Dampfdruck bei Temperaturen von 200–250 °C gehärtet. Beim Erhärtungsvorgang wird die Kieselsäure an der Oberfläche der Zuschlagkörner chemisch aufgeschlossen und verbindet sich mit dem Kalk zu unlöslichem Calciumhydrosilikat, das eine Verkitung der Zuschläge bewirkt. Die Erhärtung ist beim Verlassen des Autoklaven (nach etwa 5–10 Std.) abgeschlossen.

Kalksandsteine werden nach [N 2] als Vollsteine (KS), Lochsteine (KSL), Blocksteine und Hohlblocksteine mit mittleren Rohdichten von 0,5 bis 2,2 kg/dm<sup>3</sup> und mittleren Druckfe-

stigkeiten von 2,5 bis 35,0 N/mm<sup>2</sup> hergestellt. Vormauersteine (KSVm) und Verblender (KSVb) müssen frostbeständig sein und eine mittlere Mindestdruckfestigkeit von 15,0 N/mm<sup>2</sup> (KSVm) bzw. 25,0 N/mm<sup>2</sup> (KSVb) aufweisen. Kalksandsteine sind weiß, können durch Pigmentbeimischungen auch farbig hergestellt werden. Sie sind aufgrund ihres Kalkgehalts säureempfindlich und sollten daher in chemischen Betrieben und in aggressivem Grundwasser nicht verwendet werden.

#### 5.8.3.2 Hüttensteine

Hüttensteine bestehen im wesentlichen aus granulierter Hochofenschlacke (Hüttensand), die mit Zement oder Kalk gemischt und zu Formlingen gepreßt wird. Die Härtung erfolgt an der Luft, unter Dampf oder in kohlesäurehaltigen Abgasen (s. Abschn. 5.6.).

Bei der Lufthärtung wird die latente Hydraulizität des Hüttensandes durch die Kalkzugabe aktiviert. Die Aushärtung unter Dampf verläuft wie bei Kalksandsteinen in Autoklaven. Bei Einwirkung von kohlesäurehaltigen Abgasen reagiert die Kohlensäure mit dem Bindemittel unter Carbonatbildung.

Hüttensteine werden nach [N 3] als Vollsteine (HSV), Lochsteine (HSL) und Hohlblocksteine (HHbl) mit mittleren Rohdichten von 1,0 bis 2,0 kg/dm<sup>3</sup> und Druckfestigkeiten von 7,5–35,0 N/mm<sup>2</sup> hergestellt. Hüttensteine mit Druckfestigkeiten 15,0; 25,0; oder 35,0 N/mm<sup>2</sup> können als Vormauersteine verwendet werden, wenn ihre Frostbeständigkeit nachgewiesen ist.

#### 5.8.3.3 Betonsteine

##### *Leichtbetonsteine*

Leichtbetonsteine bestehen aus porigen mineralischen Zuschlagstoffen und hydraulischen Bindemitteln. Man unterscheidet zwischen Vollsteinen, Vollblöcken, Hohlblocksteinen und Lochsteinen. Vollsteine (V) und Vollblöcke (Vbl) sind Mauersteine ohne Kammern mit einer Höhe bis zu 115 mm bzw. von 238 mm. Sie werden in den Rohdichteklassen 0,5 bis 2,0 kg/dm<sup>3</sup> hergestellt und müssen je nach Festigkeitsklasse eine mittlere Druckfestigkeit von 2,5 bis 15,0 N/mm<sup>2</sup> aufweisen.

Hohlblocksteine sind großformatige Mauersteine, die senkrecht zur Lagerfläche mit fünfseitig verschlossenen Luftkammern versehen sind. Die Ausbildung der Kammern ist in [N 10] festgelegt. Nach der Anzahl der Luftkammern werden die Hohlblocksteine mit 1K Hbl bis 4K Hbl bezeichnet. Hohlblocksteine aus Leichtbeton werden in den Rohdichteklassen 0,5 bis 1,4 kg/dm<sup>3</sup> mit mittleren Druckfestigkeiten von 2,5 bis 7,5 N/mm<sup>2</sup> hergestellt.

Lochsteine (LLB) werden mit Rohdichten von 0,6 bis 1,6 kg/dm<sup>3</sup> und Druckfestigkeiten von 5,0; 7,5 und 15,0 N/mm<sup>2</sup> hergestellt. Die Lochungen (Anteil mindestens 25% der Lagerfläche) müssen gleichmäßig über die Querschnittsfläche verteilt sein.

##### *Gasbetonsteine und -platten*

Gasbetonsteine und -platten werden aus feingemahlenen oder feinkörnigen kieselsäurehaltigen Zuschlägen (Quarzsand, Flugasche, Hochofenschlacke, Ölschieferasche),

Zement und/oder Kalk unter Verwendung von Treibmitteln (z.B. Aluminiumpulver) und Wasser hergestellt und in gespanntem Dampf gehärtet. Gasbeton besitzt gute Wärmedämmeigenschaften, ist leicht zu verarbeiten (sägbar, nagelbar) und feuerbeständig. Gasbetonsteine sind für tragendes oder nichttragendes Mauerwerk, Gasbetonplatten nur für nichttragende Bauteile (leichte Trennwände) einsetzbar [N 6], [N 7]. Zu beachten ist, daß Gasbeton keinen ausreichenden Korrosionsschutz für Stahleinlagen bietet, so daß zusätzliche Schutzmaßnahmen erforderlich sind.

Tab. 5.8.3 Übersicht über die Gasbeton-Blocksteine [N 6]

Festigkeitsklasse	Druckfestigkeit N/mm <sup>2</sup>		Rohdichte Klasse kg/dm <sup>3</sup>	mittlere Rohdichte kg/dm <sup>3</sup>
	Mittelwert	kleinster Einzelwert		
G 2	2,5	2,0	0,5	0,41–0,50
G 4	5,0	4,0	0,7 0,8	0,61–0,70 0,71–0,80
G 6	7,5	6,0	0,8	0,71–0,80

#### Betonsteine aus Normalbeton

Auf vorgefertigte Erzeugnisse aus Normalbeton wie Bordsteine, Pflastersteine, Rohre, Gehwegplatten, Hohlblocksteine, Werksteine etc. soll hier nicht eingegangen werden.

#### 5.8.3.4 Gipsbausteine und -platten

Gipsbauplatten sind leichte Bauelemente, die aus Stuckgips mit oder ohne anorganischen Zuschlag- oder Füllstoffen ggf. unter Verwendung von porenbildenden Zusätzen hergestellt werden [N 13, N 14 und N 15]. Gipsbauplatten sind nicht wasserbeständig und können daher nur für den Innenausbau verwendet werden. Wandbauplatten können bei der Herstellung leichter, nichttragender Innenwände eingesetzt werden. Deckenplatten finden als Dekor-, Schallschluck- und Lüftungsplatten Verwendung, die zusätzliche Aufgaben des Brandschutzes übernehmen können. Gipskartonplatten bestehen aus einem Gipskern, der beidseitig mit Karton ummantelt ist. Sie können als Bau-, Feuerschutz-, Putzträger- und Schallschluckplatten zur Anwendung gelangen.

#### 5.8.4 Normen, Richtlinien

- [N 1] DIN 105, T. 1: Mauerziegel, Vollziegel und Lochziegel, E 10.80.  
T. 2: Mauerziegel, Leichtziegel, E 10.80.  
T. 3: Mauerziegel, hochfeste Ziegel und hochfeste Klinker, E 11.82.  
T. 4: Mauerziegel, Keramikklinker, E 11.82.  
T. 5: Mauerziegel, Leichtlanglochziegel und Leichtlangloch-Ziegelpatten, E 11.82.
- [N 2] DIN 106, T. 1: Kalksandsteine, Vollsteine, Lochsteine, Blocksteine, Hohlblocksteine, 9.80.  
T. 2: Kalksandsteine, Vormauersteine und Verblender, 11.80.

- [N 3] DIN 398: Hüttensteine, Vollsteine, Lochsteine, Hohlblocksteine, 7.76.
- [N 4] DIN 456: Dachziegel, Anforderungen, Prüfung, Überwachung, 8.76.
- [N 5] DIN 1053, T. 1: Mauerwerk, Berechnung und Ausführung, 11.74.  
T. 2: Ingenieurmäßig bemessene Bauten, Berechnung und Ausführung, E 2.81.  
T. 3: Bauten aus Ziegelfertigbauteilen, 9.73.
- [N 6] DIN 4165: Gasbeton-Blocksteine, 2.79.
- [N 7] DIN 4166: Gasbeton-Bauplatten, unbewehrt, 12.79.
- [N 8] DIN 4223: Gasbeton, bewehrte Bauteile, E 8.78.
- [N 9] DIN 18149: Lochsteine aus Leichtbeton, 3.75.
- [N 10] DIN 18151: Hohlblocksteine aus Leichtbeton, 2.79.
- [N 11] DIN 18152: Vollsteine und Vollblöcke aus Leichtbeton, 12.78.
- [N 12] DIN 18155: Feinkeramische Fliesen, V 3.76.
- [N 13] DIN 18163: Wandbauplatten aus Gips, 6.78.
- [N 14] DIN 18169: Deckenplatten aus Gips, 10.79.
- [N 15] DIN 18180: Gipskartonplatten, 7.77.

#### 5.8.5 Literatur

- [1] Mauerwerk-Kalender 1983. 8. Jg. Wilh. Ernst & Sohn; Berlin, München.
- [2] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile. Band 2: Beton, 2. Aufl. 1981, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin.
- [3] Plaul, Th.: Technologie der Grobkeramik. Band 1, VEB-Verlag 1965.
- [4] Salmang, H. und Scholze, H.: Die physikalischen und chemischen Grundlagen der Keramik. Springer-Verlag 1968.
- [5] Ziegeleitechnisches Jahrbuch. Verschied. Jahrgänge, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin.

### 5.9 Bauglas

#### 5.9.1 Bautechnische Bedeutung

Glas besitzt im Bauwesen in erster Linie Bedeutung als raumabschließender und lichtdurchlässiger Baustoff. Die verbreitete Anwendung großflächiger Fenster in der jüngsten Vergangenheit weist dem Glas jedoch auch andere Aufgaben zu:

- geringer Wärmetransmissionsverlust
- hohe Lichtdurchlässigkeit bei geringer Wärmestrahlungsdurchlässigkeit
- Lärmschutz
- Schutz gegen Einbruch
- Schutz gegen Feuer
- Baugestaltung u. a. m.

Die Unmöglichkeit der gleichzeitigen Erfüllung aller dieser Aufgaben führte zur Entwicklung einer Vielzahl von sog. »Funktionsgläsern«.

Um einen Überblick darüber zu erlangen, sind Kenntnisse der grundlegenden Eigenschaften des Baustoffes Glas erforderlich, die im folgenden Kapitel vor einer Zusammenfassung der Bauglaserzeugnisse erläutert werden. Der Abschn. 5.9.10 enthält Hinweise zur weiterführenden Literatur.

## 5.9.2 Chemische Zusammensetzung und Struktur des Glases

Allgemein wird unter dem Begriff Glas ein durchsichtiger, anorganischer, fester Körper verstanden, ähnlich den Kristallen, aber auch ähnlich durchsichtig wie flüssige Medien.

Zur Glasherstellung werden folgende Rohstoffe verwendet: Siliciumdioxid:  $\text{SiO}_2$ , Hauptbestandteil der technischen Gläser, kommt als Quarz und reiner, weißer Sand vor. Nur aus  $\text{SiO}_2$  bestehendes Quarzglas, Kieselglas genannt, besitzt überlegene Eigenschaften:

- hoher Erweichungspunkt von rd. 1600 °C
- geringe Wärmedehnung
- Wasser- und Säurebeständigkeit (außer Flußsäure)
- hohe UV-Durchlässigkeit (für Quarzlampen)
- geringe elektrische Leitfähigkeit

Kieselglas ist für die allgemeine Verwendung wegen des hohen Erweichungspunktes zu teuer, weshalb der Schmelzpunkt durch Flußmittel herabgesetzt wird.

Soda:  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow (\text{CO}_2 \uparrow) \rightarrow \text{Na}_2\text{O}$ , Flußmittel, Schmelzpunkt bei 850 °C. Verwendet man statt Soda Pottasche [ $\text{K}_2\text{CO}_3$  ( $\text{CO}_2 \uparrow$ )  $\rightarrow \text{K}_2\text{O}$ ], entsteht Kaliglas. Dieses dient zur Herstellung möglichst reiner Gläser (Kristallglas). Werden reiner Sand und Soda geschmolzen, entsteht eine wasserlösliche Glasmasse (Wasserglas).

Kalkstein:  $\text{CaCO}_3 \rightarrow (\text{CO}_2 \uparrow) \rightarrow \text{CaO}$ , durch die Zugabe von Erdalkalien können die Gläser den jeweiligen Anforderungen angepaßt werden. Durch Kalkstein wird das Schmelzprodukt aus Sand und Soda wasserunlöslich.

Aluminiumtrioxid:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , erhöht die mechanische, thermische und chemische Widerstandsfähigkeit.

Bortrioxid:  $\text{B}_2\text{O}_3$ , durch Ersatz eines Teiles des  $\text{SiO}_2$  durch  $\text{B}_2\text{O}_3$  wird die Schmelzgeschwindigkeit erhöht, die Läuterung (Entgasung) verbessert, die Entglasungsneigung (Kristallisationsneigung bei zu langsamer Abkühlung der Schmelze) nimmt ab.

Bleioxid:  $\text{PbO}$ , erhöht den Brechungsindex; für optische Gläser und Bleikristall.

Zinkoxid:  $\text{ZnO}$ , reduziert den Wärmeausdehnungskoeffizienten. Dadurch wird die Temperaturwechselbeständigkeit erhöht.

Färbungs- und Trübungsmittel: Zur Einfärbung dienen Zusätze verschiedener Metalloxide, z.B. Eisenoxid zur Grünfärbung. Zur Trübung werden der Schmelze Mehle aus Kryolith, Kaolin, Feldspat oder Zinnoxid beigegeben.

Diese und weitere Stoffe bieten die Möglichkeit sehr verschiedener Glaszusammensetzungen. Für das Bauwesen kommen jedoch nur bestimmte Gruppen in Betracht, von denen die Silikatgläser – und unter diesen wiederum die Alkali-Silikatgläser – den größten Raum einnehmen. Die Zusammensetzung von Silikatgläsern zeigt Tab. 5.9.1.

Tab. 5.9.1 Zusammensetzung von Silikatgläsern

Rohstoffe		M.-%
Kieselsäure	$\text{SiO}_2$	71–73
Natriumoxid	$\text{Na}_2\text{O}$	13–15
Calciumoxid	$\text{CaO}$	8–10,5
Magnesiumoxid	$\text{MgO}$	1–4
Tonerde	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,5–1
Säurereste		0,3–0,7
Eisenoxid	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,1
Kaliumoxid	$\text{K}_2\text{O}$	0–1

Für die Struktur des Glaszustandes gibt es bis heute keine exakte Definition, sondern lediglich Arbeitshypothesen [2], [3], [5]: Beim Abkühlen der Rohstoffschmelze wird die Beweglichkeit der Teilchen stark eingeschränkt, ohne daß genügend Zeit zur Ausbildung eines Raumgitters bleibt. Das stoffliche System geht unter Beibehaltung seines Ordnungszustandes in den festen Aggregatzustand über und erstarrt amorph. Das Glas nimmt im Ordnungszustand seiner Bausteine gemeinsam mit den Flüssigkeiten eine Mittelstellung zwischen dem Gaszustand (frei beweglich, ungeordnet) und dem kristallinen Zustand (fast unbeweglich, geordnet) ein. Glas ist ein physikalisch homogener, isotroper Stoff mit den elastischen Eigenschaften eines Festkörpers und dem Ordnungszustand einer Flüssigkeit.

Bei einer Temperatur von 1400–1600 °C ist Glas so dünnflüssig wie Wasser (niedrige Viskosität:  $10^1$  Pas ( $\triangleq \text{Ns/m}^2$ )). Beim Abkühlen des Glases auf Zimmertemperatur ergibt sich jedoch keine sprunghafte Phasenveränderung wie beim Gefrieren von Wasser, sondern es wird lediglich immer zähflüssiger, bis es ein starrer, scheinbar »fester« Stoff ist. Es besitzt aber nach wie vor die innere Struktur einer Flüssigkeit, jedoch mit der hohen Viskosität von ca.  $10^{24}$  Pas. Glas ist somit eine Flüssigkeit, die weit über den Punkt hinaus abgekühlt ist, an dem sie kristallisieren könnte (und manchmal kristallisiert, s. Entglasung): Eingefrorene Schmelze oder unterkühlte Flüssigkeit. Bild 5.9.1 zeigt Modellvorstellungen der Glasstruktur.

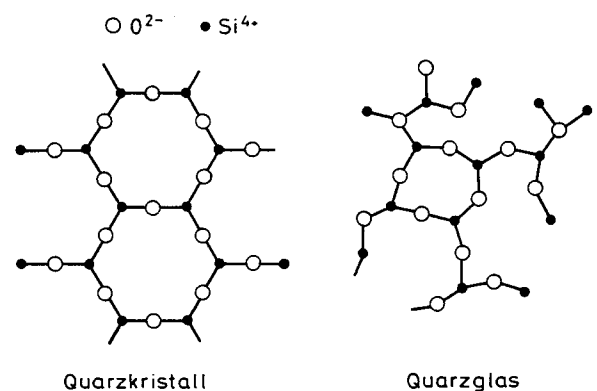


Bild 5.9.1 Strukturen von Quarz und Quarzglas

## 5.9.3 Herstellung und Verarbeitung

Unter Glasherstellung ist der Schmelzprozeß zu verstehen, bei dem über die chemische Zusammensetzung die Eigen-

schaften des Glases beeinflusst werden. Diese Beeinflussung findet im Verarbeitungsprozeß ihren Fortgang, in dem die Formung und chemische oder physikalische Nachbehandlung des Glases stattfindet [6].

### 5.9.3.1 Schmelzvorgang

Das Schmelzen des Rohstoffgemenges erfolgt in Hafenöfen (kleine Mengen, hochwertige Gläser) oder in Wannenöfen (große Mengen, Baugläser). Ab rd. 1150 °C liegt chemisch das eigentliche Glas vor, das aber durch weitere Erhitzung und/oder durch Zugabe von Läuterungsmitteln entgast werden muß. Durch »Abstehen« wird die Schmelze auf 600 bis 1000 °C abgekühlt und besitzt dann die zur Verarbeitung erforderliche Zähflüssigkeit.

### 5.9.3.2 Formgebung

Folgende Verfahren werden angewandt:

- a) Blasen: Handwerkliches Verfahren (Glasmacherpfeife) für Antik- und bestimmte Farbgläser.
- b) Ziehen: Verfahren zur Herstellung von Flachglas mit feuerblanker Oberfläche (Feuerpolitur) durch Ziehen eines Glasbandes aus der Schmelzwanne, auch über eine Metallschmelze hinweg (Floatglas).
- c) Gießen und Walzen: Gußglas ist gegossenes und anschließend flach ausgewalztes Glas. Das Verfahren ist geeignet, dickes Tafelglas und oberflächenprofiliertes Glas (Ornamentglas) mit oder ohne Drahteinlage herzustellen.
- d) Pressen: Verfahren zur Herstellung von Betongläsern, Glasbausteinen, Haushaltsgläsern, durch Einpressen von Schmelzmasse in Formen.
- e) Sonderverfahren: Zur Herstellung von Glasfäden, Schaumglas etc.

### 5.9.3.3 Nachbehandlung

- a) Schleifen und Polieren: Gewalztes oder ohne Feuerpolitur gezogenes Glas ist nicht völlig eben und muß deshalb geschliffen und poliert werden.
- b) Biegen und Härten: Biegen ist ein Formungsprozeß mit Wärme. Daran schließt sich bei der Herstellung von Sicherheitsglas das Härten durch plötzliches Abkühlen der Oberflächen an (Eigenspannungszustand).
- c) Ätzen, Sandstrahlen, Überfangen: Zur Herstellung von Mattglas wird die Oberfläche geätzt oder gesandstrahlt. Überfangen ist ein Überzug aus gefärbtem oder getrübbtem Glas auf einem Grundglas.
- d) Beschichten: Überzüge aus Emaille oder Farbe sind möglich. Zum Erzielen bestimmter optischer Eigenschaften können Metalle oder -legierungen aufgedampft werden etc. (s. Sonnenschutzgläser).

## 5.9.4 Eigenschaften des Glases

### 5.9.4.1 Chemische Eigenschaften

Mit Ausnahme gegen Flourverbindungen und konzentrierte Laugen ist Glas sehr resistent. Glas ist witterungs- und

korrosionsbeständig, nicht entflammbar und unbrennbar. Eine Auslaugung durch Wasser ist durch falsche Lagerung von Scheiben möglich, wenn sie sich im feuchten Zustand länger berühren. Eine Klassifikation nach Beständigkeit erfolgt nach [N 7], [N 8] und [N 15].

### 5.9.4.2 Optische Eigenschaften

Die grundlegenden optischen Eigenschaften der Gläser sind bereits in Abschn. 4.4 behandelt worden. Wesentlich ist die Durchsichtigkeit und Durchlässigkeit von Glas im Bereich der optischen Strahlung (Bild 5.9.2). Tab. 5.9.2 enthält hierzu Angaben für einige Glassorten. Tab. 5.9.3 zeigt die Abhängigkeit der Durchlässigkeit vom Einfallswinkel.

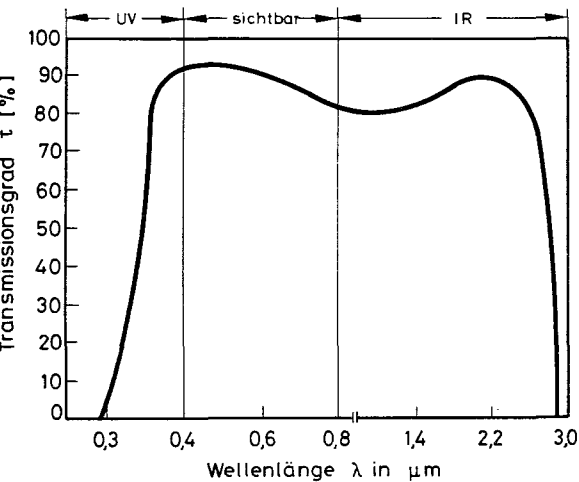


Bild 5.9.2 Lichtdurchlässigkeit von Fensterglas (MD)

Wie in Abschn. 4.4 erläutert wurde, entsteht der Transmissionsverlust durch Reflexion und Absorption. Völlig durchsichtige Gläser transmittieren die Lichtstrahlung, sieht man von der oberflächlichen Brechung ab, unverändert. Die lichtstreuenden Matt- und Trübgläser brechen die Strahlung vielfältig; damit sind sie wohl mehr oder weniger durchscheinend, aber nicht mehr durchsichtig (unscharfes Bild). Die Durchlässigkeit für UV-Strahlen fällt mit abnehmender Wellenlänge rasch ab. Die kurzwellige IR-Strahlung der Sonne dringt nahezu unbehindert in Räume ein und wird dort von Gegenständen, Umfassungswänden etc. absorbiert, die sich dabei erwärmen. Für die von ihnen abgestrahlte, langwellige Wärmestrahlung aber ist Glas undurchlässig, was zur Raumaufheizung führt.

Tab. 5.9.2 Lichtdurchlässigkeit von Baugläsern

Glasart	Lichtdurchlässigkeit [%]
Fensterglas	90–92
Kristallspiegelglas	90–92
Gartenglas	88–90
Drahtspiegelglas	~88
Gußglas, Drahtglas	80–90
Verbund-Sicherheitsglas, Mehrscheibenglas	85–90

Tab. 5.9.3 Abhängigkeit Lichtdurchlässigkeit – Einfallswinkel

Einfallswinkel [Grad]	Lichtdurchlässigkeit [%]	Lichtverlust [%]
0	92	8
30	90	10
40	89	11
50	87	13
60	83	17
70	73	27
75	60	40
> 75	< 60	> 40

#### 5.9.4.3 Mechanische Eigenschaften

Glas ist ein ideal-elastischer spröder Werkstoff, der bei einer Bruchdehnung von rd. 0,1% verformungsarm mit muschelliger Bruchfläche versagt. Glas ist äußerst kerbempfindlich; bereits kleine Oberflächenschäden führen zu Festigkeitsverlusten. Die Zugfestigkeit liegt deutlich unter der Druckfestigkeit und nimmt mit abnehmender Probengröße zu. Tab. 5.9.4 zeigt die mittleren mechanischen Kennwerte. Große praktische Bedeutung besitzt die Härte von Glas. Nach der Mohs'schen Härteskala wird sie nur von der von Topas, Korund und Diamant übertroffen.

Tab. 5.9.4 Mechanische Kennwerte für Glas

Druckfestigkeit	880–930 N/mm <sup>2</sup>
Zugfestigkeit	30– 90 N/mm <sup>2</sup>
Biegezugfestigkeit	30– 90 N/mm <sup>2</sup>
Biegezugfestigkeit (prakt. Rechenwert)	30 N/mm <sup>2</sup>
Schlagfestigkeit (zum Bruch erforderliche Schlagarbeit)	d = 4 mm: 1,2 N · m d = 6 mm: 4,1 N · m
E-Modul	70 000–75 000 N/mm <sup>2</sup>
Querdehnzahl	0,25
Abschreckfestigkeit ( $\Delta\theta$ )	60–100 °C
Erweichungstemperatur	560–580 °C
Dichte	2,5 kg/dm <sup>3</sup>

#### 5.9.4.4 Thermische Eigenschaften

Der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient (Wärmedehnzahl) von Bauglas beträgt rd.  $90 \cdot 10^{-7} \text{ [}^\circ\text{C}^{-1}\text{]}$ . Bei großflächigen Scheiben in Rahmenkonstruktionen sind die möglichen großen Verformungsdifferenzen zu berücksichtigen (Bruchgefahr).

Die Temperaturwechselbeständigkeit von Glas ist für das Bauwesen ausreichend groß. Bei sehr hohen Temperaturdifferenzen sind Borsilikatgläser (Jenaer-) zu verwenden. Die Wärmeleitfähigkeit von Glas beträgt rd. 0,9 W/mK (bei Schaumglas viel niedriger). Die Wärmeabsorption ungefärbten Fensterglases ist sehr gering.

### 5.9.5 Einteilung der Baugläser

Die Bezeichnung der Baugläser ist recht unterschiedlich. Hier wird eine Aufteilung nach der Geometrie in die folgenden Oberbegriffe gewählt, deren weitere Unterteilungen zwar auch nicht systematisch eindeutig sind, sich aber auf übliche Begriffe beschränken [1], [4], [6]:

- Flachglas
- Kompaktglas
- Faserglas
- Schaumglas

### 5.9.6 Bauglaserzeugnisse und Anwendung

#### 5.9.6.1 Flachglas

##### a) Fensterglas

Flachglas ist in [N 2] definiert; es wird in Dicken von 0,7 bis 1,9 mm als Dünnglas und mit 2,8 mm Dicke als MD-Glas in unterschiedlichen Größen produziert. Der Zusammenhang zwischen der Größe und Dicke einer Scheibe ergibt sich aufgrund der Biegezugfestigkeit.

Hinsichtlich der Ebenheit der Oberfläche und der Durchsichtigkeit werden unterschiedliche Qualitätsstufen festgelegt. Anwendung: Verglasung von Fenstern, Türen, Schau-fenstern, Möbelbau u. a. Weiterverarbeitung zu Isolierglas, Verbund-Sicherheitsglas, gebogene Scheiben, Spiegeln und Mattglas.

##### b) Kristallspiegelglas, Floatglas

Das teure Kristallspiegelglas geringer Dicke wird zunehmend durch Floatglas, das keinerlei mechanische Oberflächenbearbeitung mehr erfordert und das dem Kristallspiegelglas gleichwertig ist, verdrängt. Kristallspiegelglas wird in Dicken von 4 bis 21 mm in unterschiedlichen Größen hergestellt. Anwendungen: Außenverglasung und Innenausbau. Weiterverarbeitung zu Isolierglas, Sonnenschutzglas, Sicherheitsglas u. a.

##### c) Drahtspiegelglas

Es ist ein Kristallspiegelglas, das durch Drahtlagen ein-bruchhemmend und splittersichernd ist; Dicken: 6 bis 8 mm. Anwendungen: Trennwände, Balkonbrüstungen, Geländer sowie als feuerhemmende Verglasung.

##### d) Gußglas, Drahtglas

Kennzeichnend ist die mehr oder weniger ausgeprägte Ornamentierung der Oberfläche, die den Grad der Durchsichtbehinderung sowie die Lenkung und Streuung des Lichts bestimmt. Anwendungen: Eingangstüren, Terras-sendächer, Sichtblenden im Freien, Balkonbrüstungen, Industrieverglasung u. a. m. Die Weiterverarbeitung erfolgt wie für Flachglas.

##### e) Farb- und Sondergläser

Durch Pigmente können Guß-, Antik- und andere Gläser eingefärbt werden. Milchglas ist milchig-weiß getrübt. Milchüberfangglas ist ein in sich homogenes Zweischicht-glas mit einer weißen Überzugsschicht auf einer farblo-

sen oder eingefärbten Grundsicht (geringer Lichtverlust bei hohem Streuvermögen). Anwendungen: Lichtdecken, Leuchtkörper u. a.

#### f) Sicherheitsgläser

Sicherheitsgläser werden im Bauwesen für Schaufenster, für Glastrennwände und Türen in Schulen und in anderen Gebäuden mit Menschengedränge verwendet. Man unterscheidet zwischen Einscheiben-, Verbundsicherheitsglas, Draht- und Drahtverbundsicherheitsglas [N 10 bis N 14]. Das Einscheibensicherheitsglas erhält durch eine sehr rasche Abkühlung innere Spannungen, wobei die Scheibenoberfläche unter hoher Druckspannung steht (Vorspannung). Dadurch entsteht ein Glas, das eine hohe Festigkeit besitzt und deshalb höhere Beanspruchungen erträgt. Verbund-Sicherheitsglas besteht aus zwei Scheiben mit dazwischenliegender, klebender Kunststoffolie. Zu Verbundsicherheitsglas mit oder ohne Drahteinlage können, je nach Verwendungszweck, fast alle Glasarten verarbeitet werden. Bei Zerstörung der Scheibe haften die Bruchstücke fest an der Zwischenschicht, es entstehen keine losen Glassplitter.

#### g) Wärmeschutzglas

Es dient zur Verringerung von Wärmeverlusten durch Fenster (Isolierglas). Wärmeschutzglas ist ein Verbundelement aus zwei und mehr Scheiben mit Zwischenräumen und umlaufender Dichtung. Ein Scheibenabstand von höchstens 12 mm ist sinnvoll, weil sonst ein vermehrter Wärmeverlust durch Konvektion des eingeschlossenen Gases (Umwälzung) entsteht. Der Zwischenraum zwischen den Scheiben ist durch trockene Luft oder durch ein Edelgas (z. B. Argon, kleinerer  $\lambda$ -Wert als Luft) gefüllt. Wesentlich für die Funktionsfähigkeit ist die Dichtigkeit der umlaufenden Scheibenverbindung (i. d. R. metallische Abstandhalter und organische Dichtstoffe).

Das Versagen der Dichtigkeit zeigt sich durch inneres Beschlagen und Verschmutzen an. Wärmeschutzglas mit einer Metallbeschichtung auf der Außenscheibe (zum Rauminneren hin angebracht) dient außerdem dem Sonnenschutz.

#### h) Sonnenschutzglas

Gegenüber herkömmlichen Sonnenschutzmaßnahmen (Jalousien, Vorhänge u. a.), die zum Blendschutz allerdings häufig zusätzlich erforderlich sind, bieten Sonnenschutzgläser den Vorteil der ständigen Wirksamkeit und Wartungsfreiheit. Man unterscheidet zwischen Absorptions- und Reflexionsgläsern, deren Wirkungsweise in Abschn. 4.4 erklärt wird.

Sonnenschutzgläser sollen selektiv wirken, indem sie die Strahlung im IR-Bereich stärker schwächen als die Strahlung im sichtbaren Bereich. Mit Gläsern, die vorwiegend absorbieren (Absorptionsgläser) ist das nur in geringem Maße möglich. Da sie sich außerdem stark aufheizen, tritt ihre Bedeutung zurück.

Vorwiegend reflektierende Gläser (Reflexionsgläser), die die o. g. Forderung besser erfüllen, werden entweder durch Metallbedampfung oder durch Tauchbeschichtung mit Metalloxiden (Interferenzschichten) hergestellt [1], [8]. Mit einer Metallschicht (oft Gold) bedampfte Gläser verursa-

chen Farbverzerrungen in der Durchsichtigkeit von innen nach außen und in der Ansicht von außen. Mit Interferenzschichten versehene Gläser sind farbneutral, aber in ihrer Selektivwirkung auch schwächer.

Sonnenschutzgläser werden i. d. R. auch als Wärmeschutzglas und als Mehrscheibenverbundsicherheitsglas ausgebildet.

#### i) Schallschutzglas

Durch Isolierscheiben läßt sich das Schalldämmungsvermögen nur unwesentlich erhöhen, da im Bereich der Eigenfrequenz beide Scheiben, durch das Luftpolster gefedert, gegeneinander schwingen (Resonanzerscheinung). Erst eine Vergrößerung des Scheibenabstandes auf ca. 100 mm verhindert Resonanzeffekte. Weiterhin läßt sich die Schalldämmung durch die Verwendung sehr dicker Einzelscheiben oder durch Verbundsysteme mit Scheiben erheblich unterschiedlicher Steifigkeit bei möglichst großer innerer Dämpfung verbessern. So wird z. B. eine dicke Einzelscheibe mit einem dünnen Verbundglas mit viskoelastischer Zwischenschicht kombiniert. Derartige Schallschutz-Verbundsysteme werden auch mit Metallbedampfung hergestellt und erfüllen dann gleichzeitig die Funktion eines Sonnenschutzglases. Bzgl. des Schalldämmvermögens von Fenstern s. [N 16].

#### j) Profilglas

Profilglas ist ein U-förmig ausgebildetes, kontinuierlich hergestelltes Gußglas mit oder ohne Drahteinlagen. Die Oberflächenstruktur verursacht bei guter Lichtdurchlässigkeit eine starke Streuung. Wegen des U-Querschnittes ist es hoch belastbar (großes Widerstandsmoment, mehrere Meter Höhe ohne Stützen und Riegel verglasbar). Anwendungen: Lichtwände, -bänder, Treppenhäuser, Hallen, Dachverglasungen und Trennwände. Bei zweischaliger Verlegung verbessern sich Schall- und Wärmedämmeigenschaften erheblich.

#### k) Wellglas

Wellglas ist in der Profilierung auf Wellasbestzement-Profile abgestimmt, um in Dachdeckungen lichtdurchlässige Teilflächen herzustellen. Es wird i. a. mit einem Drahtnetz versehen.

### 5.9.6.2 Kompaktglas

#### a) Glasbausteine

Sie werden in verschiedenen Maßen (bis  $30 \times 30 \times 10$  cm) in einer Vielzahl von Dekors und Farben hergestellt. Aufgrund ihrer großen Masse und des Hohlraumes besitzen Glasbausteine gute Schall- und Wärmedämmeigenschaften; außerdem sind sie einbruchhemmend, weitgehend stoß- und schlagfest und als widerstandsfähige Verglasung gegen Feuer einzusetzen. Anwendung: Herstellung lichtdurchlässiger Wände [N 5], [N 9].

#### b) Betongläser, Glasdachziegel

Betongläser sind massive oder hohle Glaskörper gemäß [N 6], die im Zusammenwirken mit Beton und Betonstahl zur Herstellung begeh- oder befahrbarer Oberlichter und räumlicher Tragwerke aus Glasstahlbeton dienen [N 1].

Glasdachziegel gleichen in Form und Abmessungen den Dachziegeln und werden wie diese verlegt. Sie dienen zur Herstellung lichtdurchlässiger Dachteillflächen.

#### c) Glasmosaik

Glasmosaik sind verpreßte oder gewalzte, gefärbte und undurchsichtige (opake) Plättchen mit glänzenden Oberflächen und gebrochenen Kanten. Anwendung: für Innenwände, Badezimmer, Fußböden, Schwimmbäder u. a.

### 5.9.7 Faserglas

Aus je nach gewünschten Eigenschaften verschiedenen Glasarten werden im Düsenzieh- oder -blasverfahren Fasern mit Durchmessern  $< 40 \mu\text{m}$  und mit hoher Zugfestigkeit hergestellt. Grundsätzlich lassen sich Glasfasern nach ihrer textilen Verarbeitbarkeit unterscheiden, d. h. nach ihrer Eignung zum Verspinnen, Weben, Flechten usw.

Textil verarbeitete Glasfasern werden als Bewehrungs- und/oder Trägermaterial im Verbund mit anderen Stoffen verwendet. Als linienförmiges Erzeugnis (Roving, Garn) oder flächenförmiges Erzeugnis (Gewebe, Matte, Vlies) hat textiles Faserglas große Bedeutung bei der Herstellung der glasfaserverstärkten Kunststoffe (GFK) und für die Armierung von Beschichtungen, Putzen und Abdichtungen.

Nicht textil verarbeitbares Faserglas liegt als ungeordnete Anhäufung nicht verspinnbarer Glasfasern in Form von Glaswolle, als Matte, Filz oder Zopf vor. Aufgrund des Luft-einschlusses besitzt es gute Wärmedämmeigenschaften und zeichnet sich durch hohes Schallabsorptionsvermögen aus.

### 5.9.8 Schaumglas

Durch gemeinsames Erhitzen von Glaspulver und einem gasbildenden Stoff (z. B. Kohlenstoff; oxidiert bei ca.  $1000^\circ\text{C}$ ) in einer geschlossenen Form entsteht ein geschlossenzellig sprödharter Schaumstoff, sog. Schaumglas.

Schaumglas besitzt infolge seiner kleinen Rohdichte ( $\rho = 120$  bis  $160 \text{ kg/m}^3$ ) eine geringe Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda = 0,06 \text{ W/mK}$ ) und aufgrund seines geschlossenzelligen Gefüges einen praktisch unendlich großen Wasserdampf-Diffusionswiderstand sowie keine kapillare Leitfähigkeit. Der Bereich der Anwendungstemperaturen von Schaumglas liegt zwischen  $-250$  und  $+450^\circ\text{C}$ . Seine Temperaturwechselbeständigkeit ist jedoch gering.

Verwendet wird Schaumglas hauptsächlich in Plattenform für Aufgaben, die neben einer geringen Wärmeleitfähigkeit Eigenschaften wie Unbrennbarkeit und Fäulnissicherheit verlangen, z. B. als selbsttragende Wände und Decken im Kühlraumbau oder für Dämmschichten hochtemperierter Rohrleitungen.

### 5.9.9 Normen, Richtlinien

- [N 1] DIN 1045: Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung, 12.78.
- [N 2] DIN 1249: Flachglas im Bauwesen, 5 Teile, 2.80–9.81.
- [N 3] DIN 1259: Glas, Teil 1 und 2: 7.71.
- [N 4] DIN 4109: Schallschutz im Hochbau, 6 Teile, 9.62–2.79.
- [N 5] DIN 4242: Glasbaustein-Wände, 1.79.
- [N 6] DIN 4243: Betongläser, 3.78.
- [N 7] DIN 12111: Bestimmung der Wasserbeständigkeit und Einteilung der Gläser in hydrolytische Klassen, 5.76.
- [N 8] DIN 12116: Bestimmung der Säurebeständigkeit und Einteilung der Gläser in Säureklassen, 5.76.
- [N 9] DIN 18175: Glasbausteine, 5.77.
- [N 10] DIN 52303: Biegeversuche an Sicherheitsglas, 5.81.
- [N 11] DIN 52305: Optische Prüfung von Sicherheitsglas, 2.60.
- [N 12] DIN 52306: Kugelfallversuch an Sicherheitsglas, 2.73.
- [N 13] DIN 52307: Pfeilfallversuch an Sicherheitsglas, 11.76.
- [N 14] DIN 52313: Prüfung von Glas; Bestimmung der Temperaturwechselbeständigkeit von Glaserzeugnissen, 3.78.
- [N 15] DIN 52322: Bestimmung der Laugenbeständigkeit und Einteilung der Gläser in Laugenklassen, 5.76.
- [N 16] VDI-Richtlinie 2719: Schalldämmung von Fenstern, 10.73.

### 5.9.10 Literatur

- [1] Klindt, L. B. und Klein, W.: Glas als Baustoff. Verlagsanstalt R. Müller, Köln, 1977.
- [2] Scholze, H.: Glas – Natur, Struktur und Eigenschaften. Vieweg-Verlag, 1977.
- [3] Salmang, H. und Scholze, H.: Die physikalischen und chemischen Grundlagen der Keramik. Springer-Verlag, 5. Aufl., 1968.
- [4] Wendehorst, R.: Baustoffkunde, C. R. Vincentz Verlag, Hannover, 21. erw. Aufl., 1975.
- [5] Petzold, A. und Marusch, H.: Der Baustoff Glas. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 2. Aufl., 1976.
- [6] Kühne, K.: Glas – Seine Herstellung und Anwendung. Verlag Th. Steinkopf, Dresden, 1971.
- [7] Glas im Bau: Gemeinschaftsbroschüre von Glasherstellern, 1976.
- [8] Klein, W.: Anwendung farbneutraler Reflexionsgläser im Hochbau. Glastechn. Ber. 9/1978.

## Sachwortregister

Absorption 41  
Absorptionsvermögen 40  
  -zahl 40  
  -grad 57  
Aggregatzustand 9  
Aktivierung, thermische 75  
Aktivierungsenergie 75  
Aluminium, -legierungen 94  
  -, Härtung 95  
  -, Verfestigung 95\*  
  -, Schweißen 97  
  - Korrosionsverhalten 97  
  - Oberflächenschutz 97  
  - Regellegierungen 96  
amorphe Stoffe 14  
Anelastizität 23  
Anisotropie 12  
  -ausgleich 15  
Auflösungsbestreben (Korrosion) 101  
Atom 7  
  -bau 7  
  -bindung 8  
Ausscheidung 74  
Ausscheidungshärten 74  
Austenit 74  
Austrocknung 52  
  
Baufehler (Kristall-) 11  
Baukalk 151  
  -, Arten 151  
  -, Eigenschaften 152  
  -, Erhärtung 151  
  -, Erzeugung 151  
Baustahl s. Stahl  
Baustoffe, Def. 3  
Benetzung 50  
Benetzungswinkel 50  
Beanspruchung, mechanische 17  
Beanspruchung, korrosive 100  
Beschichtungen  
  -, organische B. für Korrosionsschutz 109, 205

Beton, Def. 155  
  - Abnutzwiderstand 166, 199  
  - Alkalitreiben 199  
  - Anfangserhärtung 155  
  - Anmachwasser 156, 175  
  - Ausbreitmaß 163  
  - Ausgangsstoffe 156  
  - Austrocknungsverhalten 168, 176  
  - Biegezugfestigkeit 172  
  - Blüten 164  
  - Bruchmechanismus 169  
  - Carbonatisierung 200  
  - Chemischer Angriff 166, 196  
  - chemischer Widerstand 166, 204  
  - Dauerhaftigkeit 190  
  - Dauerstandfestigkeit 178  
  - Dauerschwellfestigkeit 179  
  - Dichtungsmittel 157  
  - Druckfestigkeit 156, 165, 170  
  - Druckfestigkeitsarten 171  
  - Druckfestigkeitsprüfung 171  
  - Durchgangswert (Sieblinie) 161  
  - Durchlässigkeit 191  
  - Einbau 168  
  - Einflüsse auf die Festigkeit 173  
  - Eignungsprüfung 165  
  - Einpreßhilfe 157  
  - Endfestigkeit 168, 174  
  - Entmischungsneigung 164  
  - Erhärtung 165, 175  
  - Erhärtungsprüfung 165  
  - Erstarrungsbeschleuniger 157  
  - Erstarrungsverzögerer 157  
  - Erosion 199  
  - Faserbeton 181  
  - Festbeton 155  
  - Fließmittel, Fließbeton 157, 162  
  - Festigkeit 169  
  - Festigkeitsklassen 165  
  - Fördern 167  
  - Frischbeton 155



- Frischbetonrohddichte 163
- Frischbetontemperatur 163
- Frostbeständigkeit 195
- Frühfestigkeit 175
- Gasbeton 208
- Gasdurchlässigkeit 192
- Gefrierbeständigkeit 169
- grüner – 169
- Güteprüfung 165
- Hochtemperaturverhalten 179, 186
- junger – 175
- , Körnungsziffer 161
- , Konsistenz 162
- , Kornzusammensetzung 160
- Korrosion 196
- , Kriechen 186
- Leichtbeton 156, 206
- Luftgehalt 163, 196
- Luftporenbildner 157, 196
- Mehlkorn 162
- Mischungsentwurf 166
- Nachbehandlung 168
- Nacherhärtung 169
- Polymermodifikation 181
- Porosität 166, 191
- Pumpbeton 168
- Quellen 188
- Regelsieblinien 162
- Reife, -grad 176
- Relaxation 188
- Rißbildung 193
- Schrumpfen, s. Zement
- Schwinden 188
- Schutz von Betonbauwerken 203
- Sichtbeton 204
- Sonderbetone 206
- Spaltzugfestigkeit 172
- Stahlkorrosion im Beton 200
- Stoffraumrechnung 166
- Tieftemperaturverhalten 180, 186
- Trocknung s. Austrocknung
- Vakuumbeton 181
- Verarbeitbarkeit 162
- Verarbeitung 167
- Verdichtung 156, 162, 168
- Verdichtungswilligkeit 162
- Verfestigungsmethoden 181
- Verflüssiger 157
- Verformungsverhalten 182
- Verzögerer 157
- Verwitterung 199
- Warmbehandlung 168, 181
- Wasserundurchlässigkeit 166, 192
- Wasseranspruch 161
- Wasserzementwert 165
- Wärmedehnverhalten 189
- Witterungsbeständigkeit 199, 203
- Zugabewasser 156
- Zugfestigkeit 172
- Zusammenhaltevermögen 162
- Zusammensetzung 164, 166
- Zusatzmittel 157
- Zusatzstoffe 157
- Zuschlag 158
- Betonstahl 86
- Biegung 21
- Bindemittel, mineralische 137
- , organische 121
- Bindung 7
- Bindungsarten 8
  - energie 7
  - kräfte 7
- Bitumen 15
- Blei, -legierungen 98
- Brand 64
  - verhalten 64
  - schutz 64
  - entstehung 64
  - ablauf 64
  - nebenerscheinungen 65, 119
  - gase 65
  - widerstand 65
- Brennbarkeit v. Baustoffen 64
- Bruch 28
  - einschnürung 83
  - arten 29, 83
  - dehnung 27, 83
  - festigkeit 28
  - mechanik 28
- , Dauer- 31, 83
- , Spröd- 83
- Carbonatisierung 200
- Chemischer Angriff 166, 196
- chemischer Widerstand 166, 204
- Dämpfung 23
- Dauerspannung (Kriechen) 83
  - schwingfestigkeit von Stahl 31, 83
  - standfestigkeit von Stahl 26, 83
  - standfestigkeit von Beton 26
- Dehnung 20
  - Längs- 20
  - Quer- 20
  - Zug- 20
  - Druck- 20
- Diffusion 75
- Elastizität 22
- Elastizitätsmodul 22
- Elektrolyt 101
- elektrochemische Korrosion 101
- , Spannungsreihe 101
- Elektrode 101
- Elementarzelle 9
- Emission 40
- Emissionsvermögen 41
  - szahl 41
- Entflammbarkeit von Baustoffen 65
- Erholung (Metalle) 75
- Ermüdung 31
- Eutektikum 73

Eutektoid 73

Ferrit 74

Feuchte 44

- schutz 44
- aufnahme 45
- transport 47
- dehnung 54
- tausch 52

Feuer 64

- widerstand 66
- widerstandsdauer 66
- widerstandsklasse 67

Formänderungsarbeit 23

Gefüge 13, 80

Gips 153

- , Arten 153
- , Eigenschaften 154
- , Hydratation 153
- Bauplatten 154

Gitter (Kristall-) 10

- parameter 11
- form 11
- platz 11

Glas, Def. 14, 219

- chemische Eigenschaften 221
- chemische Zusammensetzung 220
- mechanische Eigenschaften 222
- optische 55, 221
- thermische 222
- Formgebung 221
- Nachbehandlung 221
- Schmelzvorgang 221
- Erzeugnisse 222

Glasstruktur 14, 220

Glaszustand 14, 220

Güteüberwachung 5

Guß, -werkstoffe (Eisen-) 93

- , Stahl- 93
- eisen 93
- , Temper- 93

Härtung 79

- , Ausscheidungs- 95
- , Abschreck- (Martensit) 79
- , Legierungs- 95

Holz, Def. 125

- Arten 125
- Aufbau 125
- Brettschichtholz 132
- Brandverhalten 65, 134
- chemische Zusammensetzung 125
- Dauerstandfestigkeit 129
- Eigenschaften 127
- Faser-Last-Winkel 127
- Fehler 126
- Festigkeit 127
- Feuchte 127
- Kriechen 129
- Lagenholz 132

- Leimen 136

- Schadeinflüsse 132

- Schädlinge 133

- Schwinden 127

- Schutz 134

- Verbindungen 135

- Verformbarkeit 127

- Vollholz 130

- Wärmedehnzahl 127

- Wärmeleitzahl 127

- Quellen 127

Hooke'sches Gesetz 23

Hydratation (Zement-) Def. 138

Hydratationsphase 139

-produkt 139

-stufe 139

-wärme (Abbinde-) 140

-zeit 139

-grad 140

-geschwindigkeit 140

Hydratwasser (min. Bindemittel) 143, 151, 153

hydrophil 50

hydrophob 50

Ionenbindung 8

-radius 11

Isotropie 13

Kapillarität 50

Kapillarspannung 50

-pose 50

-strömung 51

Kelvin-Körper 26

Keramische Baustoffe 215

Kolloid (Gel) 14

Korn 12

-grenzen 12

-grenzenausscheidungen 12

Kristall 9

-system 9

-it 9

-gitter 10

-plastizität 13

-baufehler 11

-abgleitung 13

Korrosion, Def. 99

- anodische 102

- Arten 103

- Belüftungselement 104

- Beanspruchung 100

- Beschichtung 109

- Chlorid- 103

- Element 101

- Elektrolyt 101

- Flächen- 103

- Formen 103

- Loch-

- Lösungsdruck 101

- kathodische 102

- Kontakt- 104

- Mulden- 103

- Passivität 103
- Potential 101
- Potentialdifferenz 101
- Prüfung 105
- Sauerstofftyp 102
- Spalt- 104
- Schutz 107
- Spannungsreihe 101
- Standardpotential 101
- Teilprozesse 102
- spannungsriß- 104
- Überzüge 108
- Wasserstofftyp 102
- Kriechen 26, 150, 188
- Kupfer, -legierungen 98
- Kunststoffe, Def. 112
- Aggregatzustand 114
- Anwendung 115, 121
- Alterung 119
- Arten 115
- Bildungsreaktion 113
- Brandverhalten 65, 119
- Chemikalienbeständigkeit 119
- Duromer 111
- Eigenschaften 116
- Elastomer 116
- Erweichungspunkt 116
- GfK 123
- Glaszustand 114
- Glasübergangstemperatur 115
- Leime 123
- Lieferformen 119
- Kleber 123
- Kunstharze 122
- Kurzzeitfestigkeit 117
- Polyaddition 113
- Polykondensation 113
- Polymerisation 113
- Resistenz 119
- Schaumkunststoffe 121
- Silikone 114
- Struktur 114
- Spannungsrißkorrosion 119
- Verarbeitung 120
- Witterungsbeständigkeit 119
- Zeitstandverhalten 118
- Zersetzungstemperatur 114
- Legieren, Legierung 71
- Legierungselemente (Stahl) 71
- elemente (Aluminium) 95
- , aushärtbare und nichtaushärtbare (Aluminium) 95
- , Guß- 95
- , Knet- 95
- Licht 55
- strom 55
- durchlässigkeit 58
- verlust 57
- verteilung 59
- streuvermögen 59
- selektivität 60
- Löslichkeit 72
- Martensit 74
- Materialprüfung 5
- Maxwell-Körper 27
- Metallbindung 8
- Metallkorrosion s. Korrosion 99
- Metallüberzüge 108
- Mischkristallbildung 71
- Mörtel, Def. 209
- Mauermörtel 210
- Putzmörtel 210
- Einpreßmörtel 213
- Estrichmörtel 211
- Monomer 113
- Newton'sche Flüssigkeit 25
- Nichteisenmetalle (NE-) 94
- Normen, -ung 5
- Oberflächenspannung 50
- Perlit 74
- Phase 72
- Phasenregel 72
- umwandlung 72, 74
- Plastizität 24
- Platzwechsel 74
- Polymer 15, 113
- Porigkeit 14
- Prüfzeichenwesen 5
- Quellen 127, 147, 189
- Querdehnzahl 20
- Raumgitter 9
- Reflexion (Licht) 57, 58
- sgrad 57
- Rekristallisation 75
- Relaxation 26, 188
- Sickerströmung 51
- Sol 14
- Sorption 53
- Sorptionsfähigkeit 53
- isotherme 54
- Spannstahl 86
- Spannung (mechanische) 17
- Last- 17
- Zwang- 17
- Eigen - 18
- Schweiß- 18
- Normal- 19
- Schub- 19
- Zug- 19
- Druck- 19
- Spannungsreihe, elektrochemische 101
- Scheren 21
- Schub 21
- Schubmodul 23
- spannung 19

Schweißen von Stahl 91  
 –, Preß- 91  
 –, Schmelz- 91  
 –, Verfahren 91  
 Schweißbeignung von Stahl 92  
 Schweißgefüge von Stahl 92  
 Schwinden 54, 127, 188  
 Schwinddehnung 54, 127, 188  
 Schwindmaß 189  
 –spannung 169, 172, 189

Stahl 71  
 – arten 82  
 – begleiter 77  
 – erzeugung 76  
 – eigenschaften, Prüfung 81  
 –, Einteilung 81  
 –, Kennzeichnung 81  
 –, Baustahl 84  
 –, Konstruktionsstahl 82, 86  
 –, Feinkornbaustahl 85  
 – Betonstahl 86  
 – Spannstahl 88  
 – nichtrostender 85  
 –, wetterfester Bau- 85  
 –, Vergütungs- 79  
 – guß 93  
 Statistik 6  
 Strahlung 40  
 Strahlungsarten 40, 56  
 –zahl 40  
 –intensität 41  
 –austausch 42  
 Streckgrenze (Fließ-, Dehn-) 82  
 Struktur 7

Teer 15  
 Temperatur 34  
 –leitzahl 39, 69  
 Textur 12, 81  
 Transmission (Licht) 57  
 Transmissionsgrad 57

Überwachung 5  
 Umformung 80

Van der Waals-Kräfte 9  
 Verbund 15  
 –verhalten 88  
 –werkstoff 15  
 Verdrehen 21  
 Verschleiß 61  
 –vorgang 61  
 –partner 61  
 –prüfung 63  
 Versetzung 12  
 verzögerte Elastizität 23  
 Viskosität 25  
 –elastizität 26

Wärme 33  
 –dämmung 33  
 –eindringzahl 39  
 –schutz 33  
 –leitung, –leitzahl 34  
 –strahlung 40  
 –speicherfähigkeit 37  
 –übergang 34  
 –übertragung 34  
 –dehnzahl, –dehnung 43  
 Wasser 44  
 –dampf 45  
 –dampfdiffusion 45  
 –dampfdiffusionswiderstandszahl, –leitzahl 48  
 –molekül 45  
 –aufnahme 51  
 Wasserstoffbrücke 9  
 –nbinding 9  
 Wasserzementwert 141, 165  
 Werkstoffe, s. Baustoffe

Zement, Def. 137  
 – Abbindewärme s. Hydratationswärme 140  
 – Anmachwasser 141  
 – Arten 137, 145  
 – Austrocknung 144, 147  
 – Bestandteile 137  
 – Befeuchtung 148  
 – chemische Widerstandsfähigkeit 150  
 – Dauerhaftigkeit 141  
 – Dichtigkeit 144, 150  
 – Eisenportlandzement 137, 145  
 – Einsatzgebiete 145  
 – Elastizität 150  
 – Erhärten 139  
 – Erstarren 139  
 – Festigkeit 145  
 – Festigkeitsklassen 145  
 – Frostwiderstand 150  
 – Gel 142  
 – Gelposen 142  
 – Gelporosität 143  
 – Hitzewiderstand 150  
 – Hochofenzement 137, 145  
 – Hydratation 138  
 – Hydratationswärme 140  
 – Kapillarposen 142  
 – Kapillarporosität 143  
 – Kapillarkwirkung 148  
 – Klinker 137  
 – Klinkerminerale 138  
 – Konsistenz 141, 146  
 – Kriechen 150  
 – Leim 141  
 – Luftporen 142  
 – Mahlfeinheit 146  
 – Normzemente 137  
 – Oberflächenenergie 148  
 – Ölschieferzement 137  
 – Phasen 139  
 – Poren 142

- Porosität 143
- Portlandzement 137, 145
- Quellen 147
- Relaxation 150
- Raumbeständigkeit 146
- Schrumpfen 147
- Schwinden 147
- Sorptionsisotherme 145
- Struktur 141
- Spaltdruck 148
- stein 139
- Traß 137
- Traßzement 137
- Treibreaktionen 146

- Verarbeitbarkeit 141
- Verformungsverhalten 147
- Wärmedehnung 149
- Wärmetönung 140
- Wasserzementwert 141

Zementit 74

Zink, -legierungen 99

Zulassungswesen 5

Zustand 73

Zustandsänderung 73

-schaubild 73

Zustandsformen 9

Zwillingsbildung 13





# Architektur Bauwesen

F.S. Rostásy

# Baustoffe

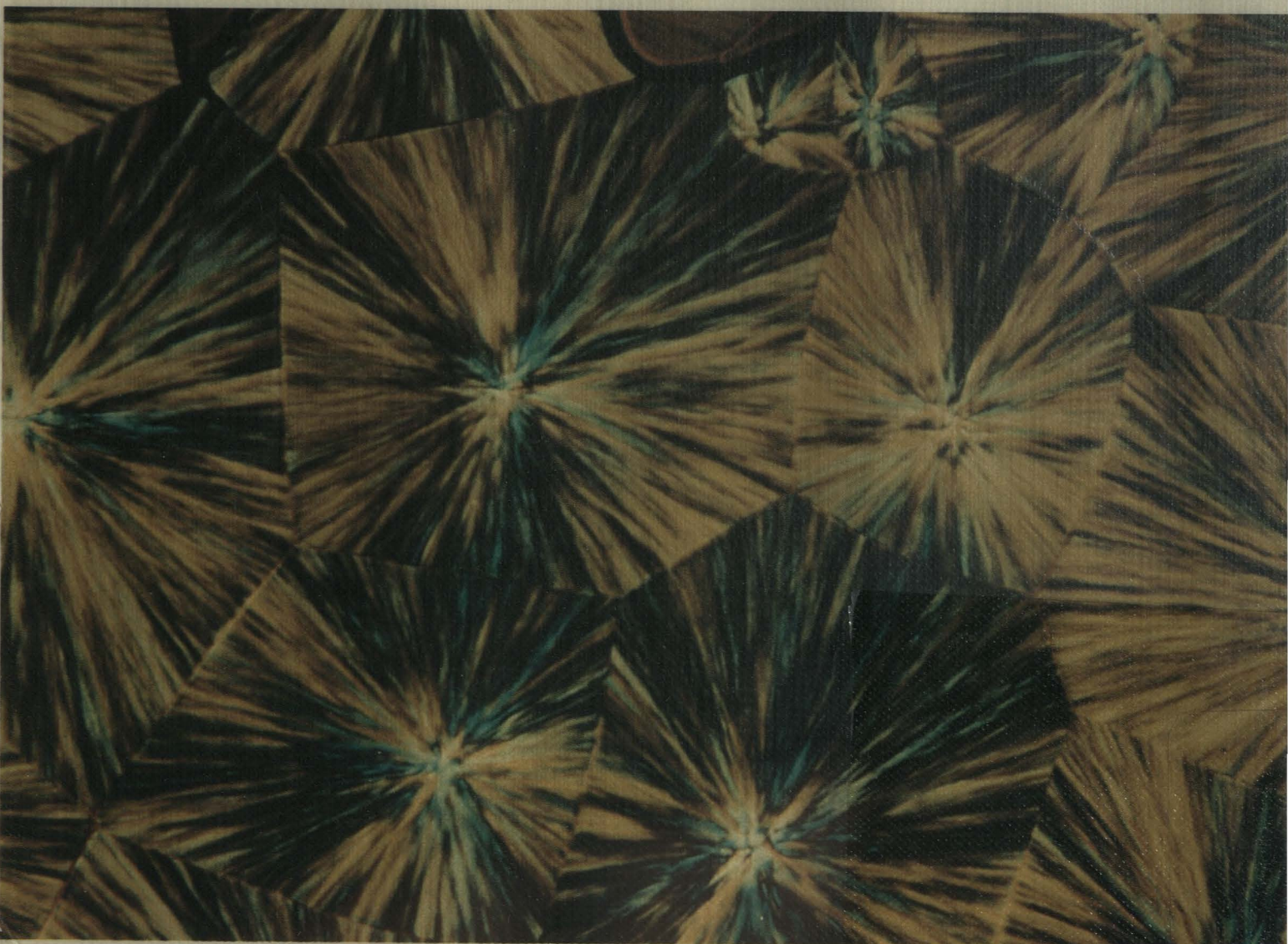
Dieses grundlegende Werk zu den Baustoffen wendet sich sowohl an Studierende der Architektur und des Bauingenieurwesens als auch an den Praktiker im Bauwesen. Planen und Bauen bedingen das Wählen von Baustoffen. Ideen werden erst durch Stoffe zur Wirklichkeit. Insofern spielen Baustoffe seit jeher eine tragende Rolle.

Die Baustoffe befinden sich in ständiger Entwicklung. Aus diesem Grunde wird den „Grundlagen des Baustoffverhaltens“ unter Lasten, Wärme, Kälte, Wasser, Brand und korrosivem Angriff breiter Raum gewidmet. Nur mit soliden Grundlagen kann man Veränderungen, neue Entwicklungen usw. begreifen und werten, auch noch Jahre nach dem Studium.

Im „Überblick über die Baustoffe“ werden die wesentlichen Baustoffe, deren Eigenschaften, Herstellung und Anwendung behandelt.

Entsprechend dem didaktischen Konzept des Buches wird dem Erkennen und Verstehen von Problemen der Vorzug gegenüber dem Ansammeln von Tatsachwissen gegeben. Literaturhinweise eröffnen den Weg zu vertieften Kenntnissen, Hinweise auf technische Regeln den Bezug zur Praxis.

**Der Autor:** Prof. Dr.-Ing. Ferdinand S. Rostásy lehrt an der Technischen Universität Braunschweig, Fachgebiet Baustoffkunde und Stahlbetonbau.



Kohlhammer

ISBN 3-17-007928-X